

22 октября, 2024

Обдирание нейтронной звезды в составе тесной двойной системы в паре с черной дырой

Н. Крамарев, А. Куранов, А. Юдин, К. Постнов
по материалам статьи [arXiv:2410.12541](https://arxiv.org/abs/2410.12541)

МОТИВАЦИЯ

Механизм обдирания маломассивной НЗ как источник слабых гамма-всплесков и мощных килоновых, большая асимметрия масс в системах НЗ-ЧД.

УСЛОВИЯ

Физические условия для начала обдирания НЗ, вклад эффектов ОТО и т.п.

РАСПРОСТРАНЕННОСТЬ

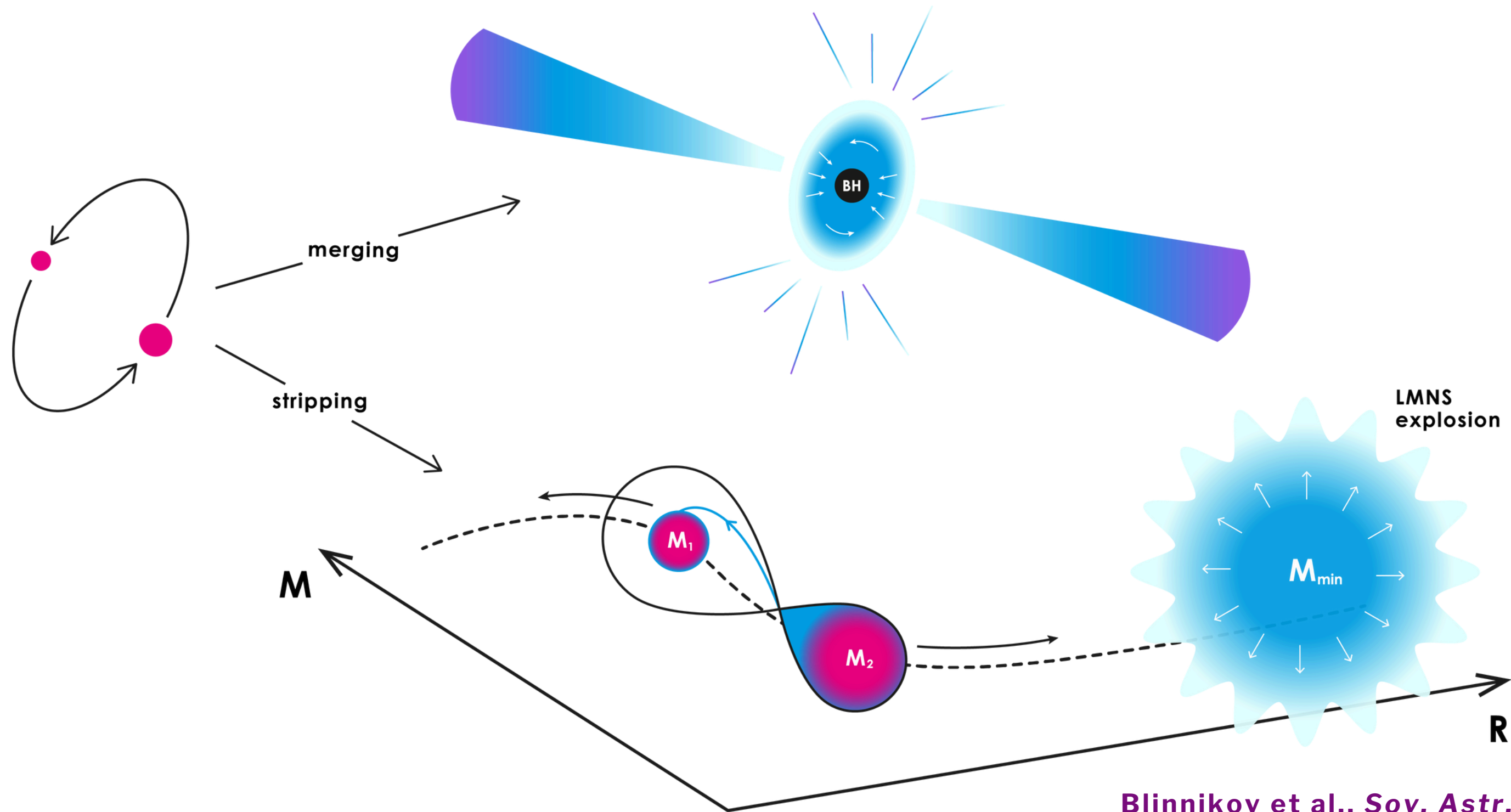
Популяционные расчеты доли числа систем НЗ-ЧД, где в конце может происходить обдирание НЗ.

ВЫВОДЫ

Основные выводы и дальнейшие перспективы развития механизма обдирания.

Содержание

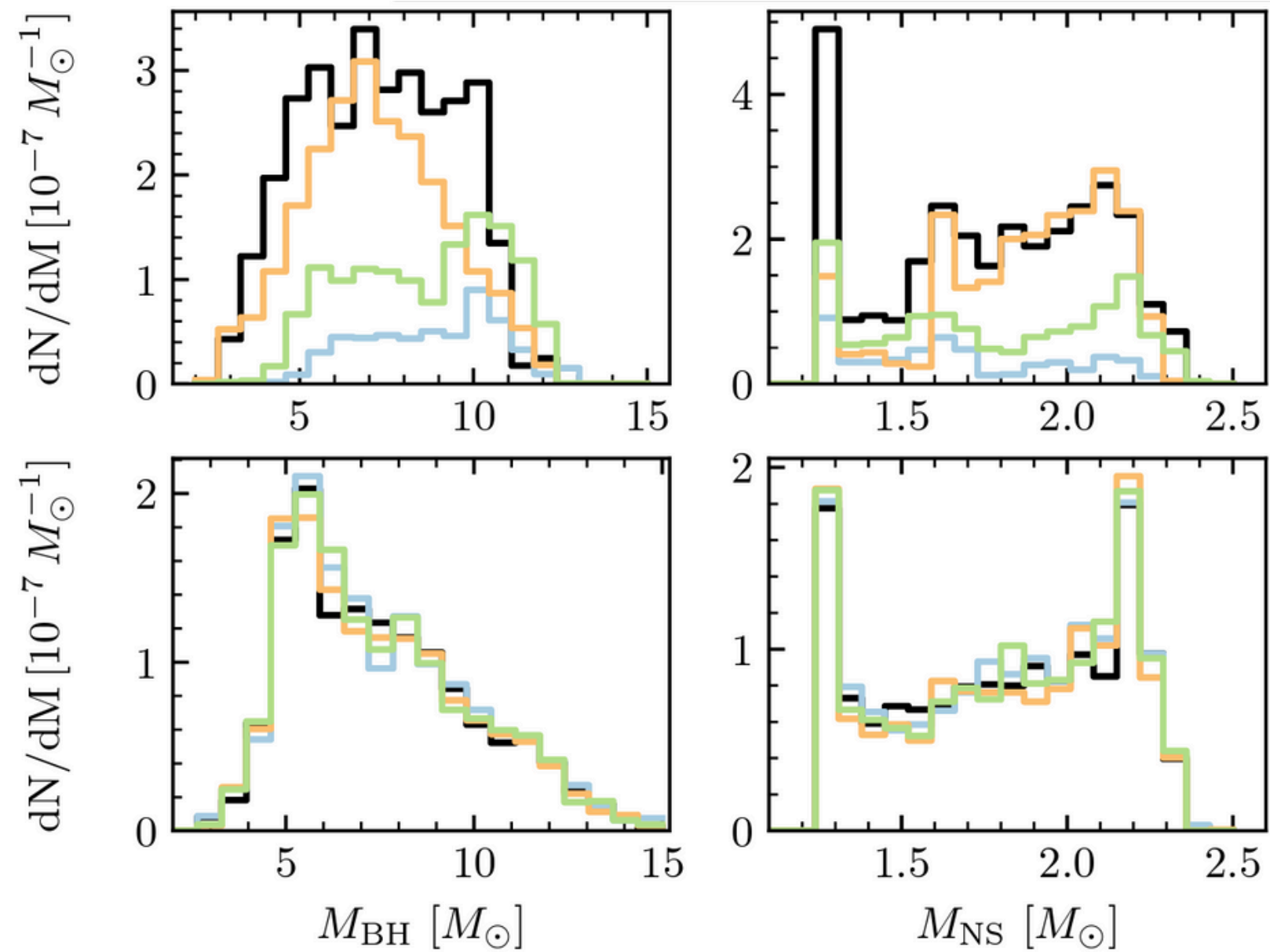
Модель обдирания НЗ для коротких гамма-всплесков



Blinnikov et al., *Sov. Astr. Let.* 10, 177-179 (1984)
Blinnikov et al., *Particles* 5, 198-209 (2022)

Мотив 1: большая асимметрия масс в системах НЗ-ЧД

Популяционные расчеты



ГВ-данные LIGO-Virgo-KAGRA

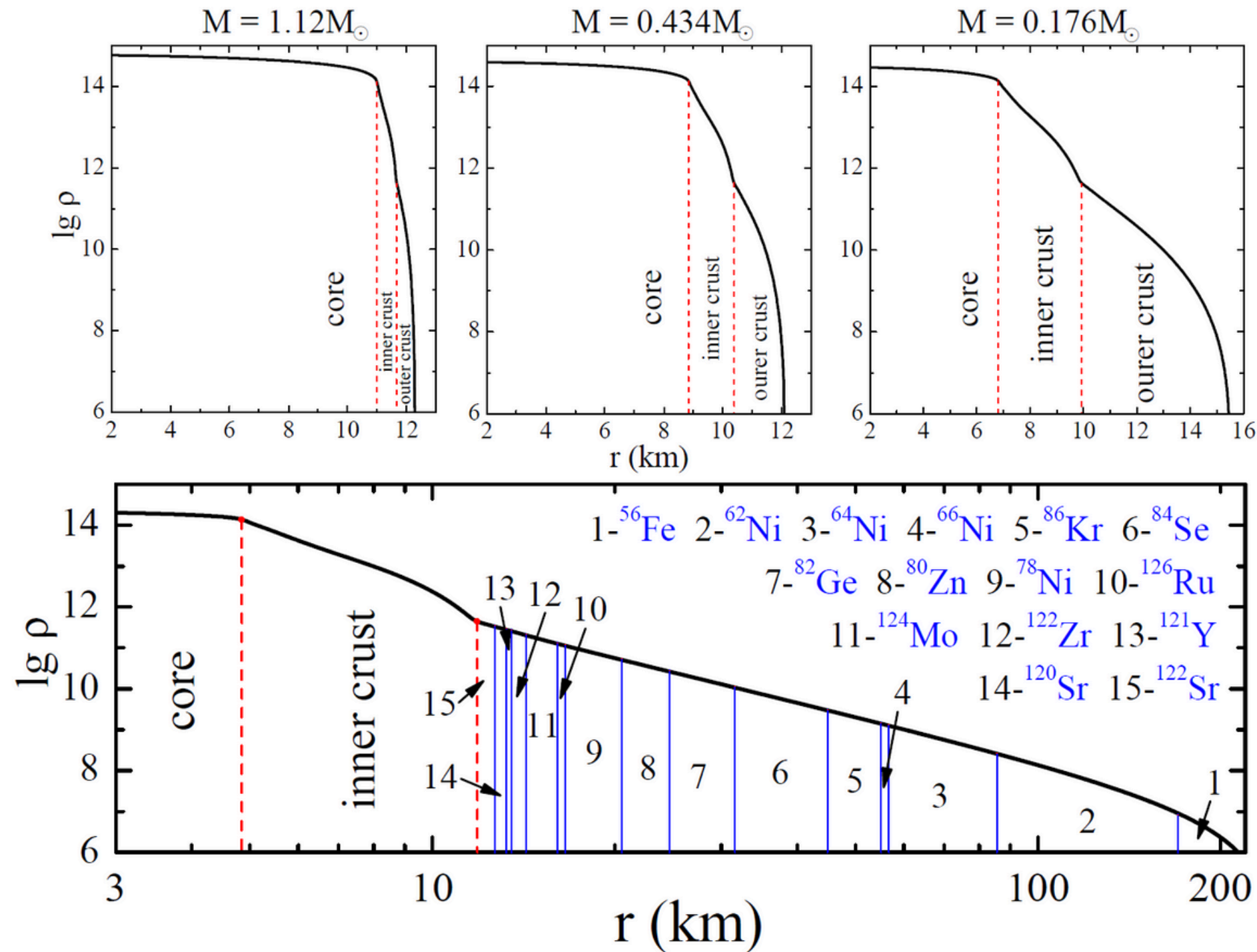
Event	$M_{\text{BH}} [M_{\odot}]$	$M_{\text{NS}} [M_{\odot}]$
GW200115 ¹	$5.7^{+1.8}_{-2.1}$	$1.5^{+0.7}_{-0.3}$
GW200105 ¹	$8.9^{+1.2}_{-1.5}$	$1.9^{+0.3}_{-0.2}$
GW190426 ²	$5.7^{+3.9}_{-2.3}$	$1.5^{+0.8}_{-0.5}$
GW190917 ³	$9.7^{+3.4}_{-3.9}$	$2.1^{+1.1}_{-0.4}$
GW191219 ⁴	$31.1^{+2.2}_{-2.8}$	$1.17^{+0.07}_{-0.06}$
+ GW230529	2.5-4.5	1.2-2.0

Мотив 2: отсутствие ЭМ сигналов от систем НЗ-ЧД

До сих пор достоверно не найдено ни одного источника электромагнитного излучения от пары НЗ-ЧД. Это может быть связано как с малостью числа таких систем (по сравнению с НЗ-НЗ), так и массы выброшенного вещества, а следовательно и слабостью килоновой и/или гамма-всплеска. В силу достаточно большой массы выброшенного вещества механизм обдирания с наблюдательной точки зрения может давать более интересные перспективы обнаружения излучения от таких систем...

ID	Q	χ	$i_{\text{tilt}} [^\circ]$	EOS	M_{ej}
1	3	0	0	APR4	$<1 \times 10^{-3}$
2	3	0	0	ALF2	0.003
3	3	0	0	H4	0.006
4	3	0	0	MS1	0.02
5	3	0.5	0	APR4	0.002
6	3	0.5	0	ALF2	0.02
7	3	0.5	0	H4	0.03
8	3	0.5	0	MS1	0.05
9	3	0.75	0	APR4	0.01
10	3	0.75	0	ALF2	0.05
11	3	0.75	0	H4	0.05
12	3	0.75	0	MS1	0.07
13	3	0.75	31	H4	0.03
14	3	0.75	62	H4	0.02
15	3	0.75	93	APR4	$<1 \times 10^{-3}$
16	3	0.75	93	H4	0.006
17	5	0.5	0	APR4	$<1 \times 10^{-3}$
18	5	0.5	0	ALF2	0.01
19	5	0.5	0	H4	0.02
20	5	0.5	0	MS1	0.05

Структура НЗ минимальной массы



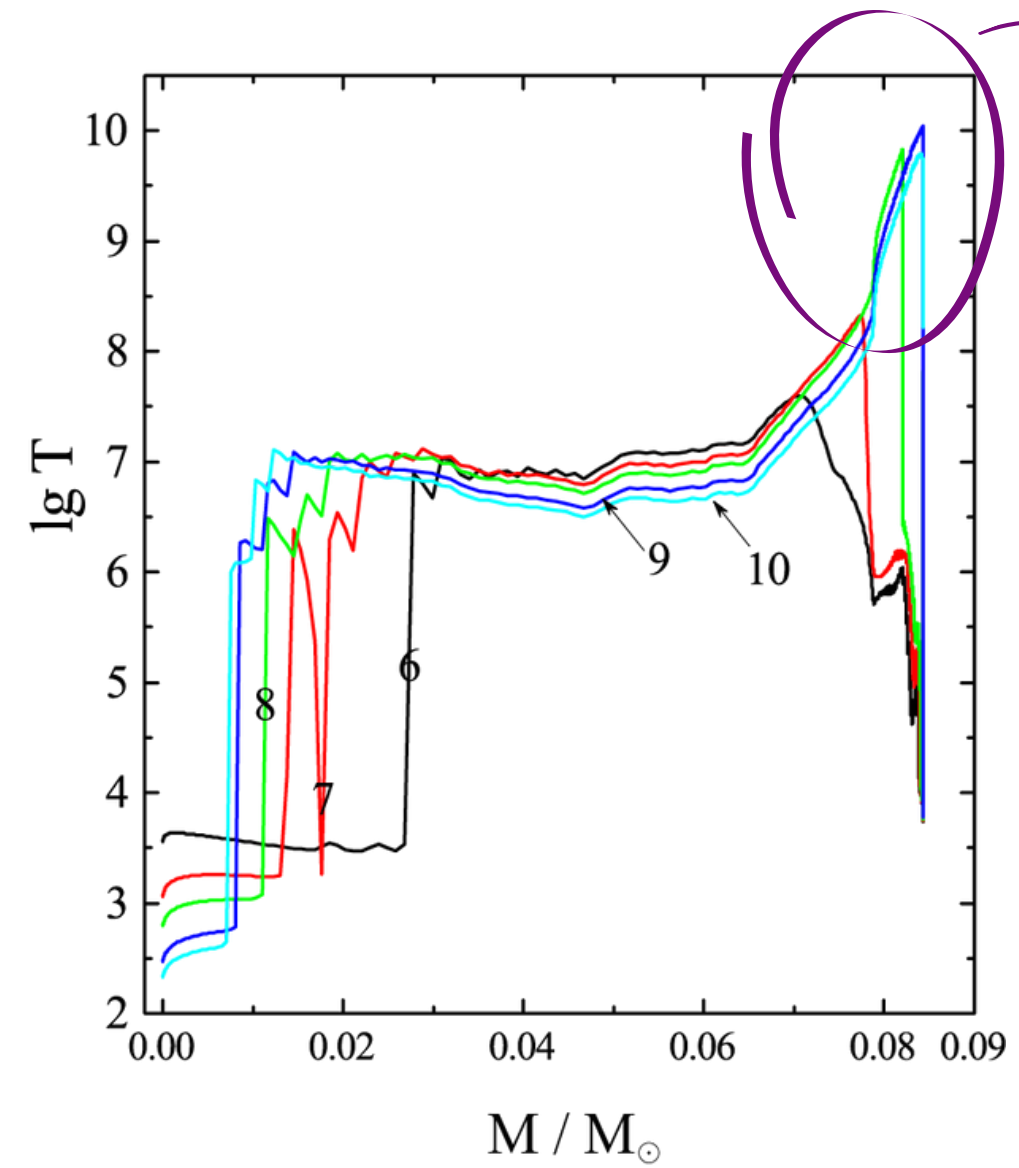
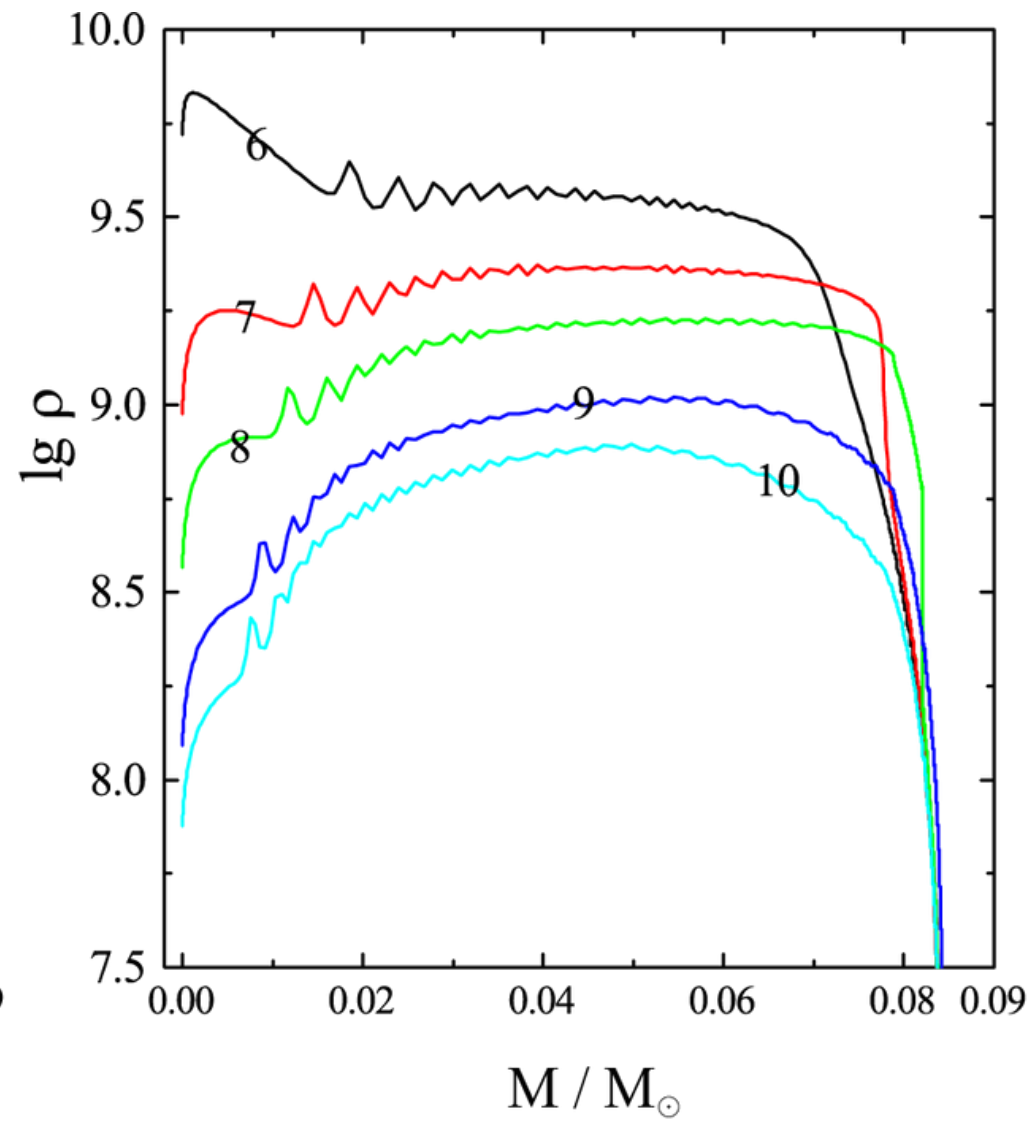
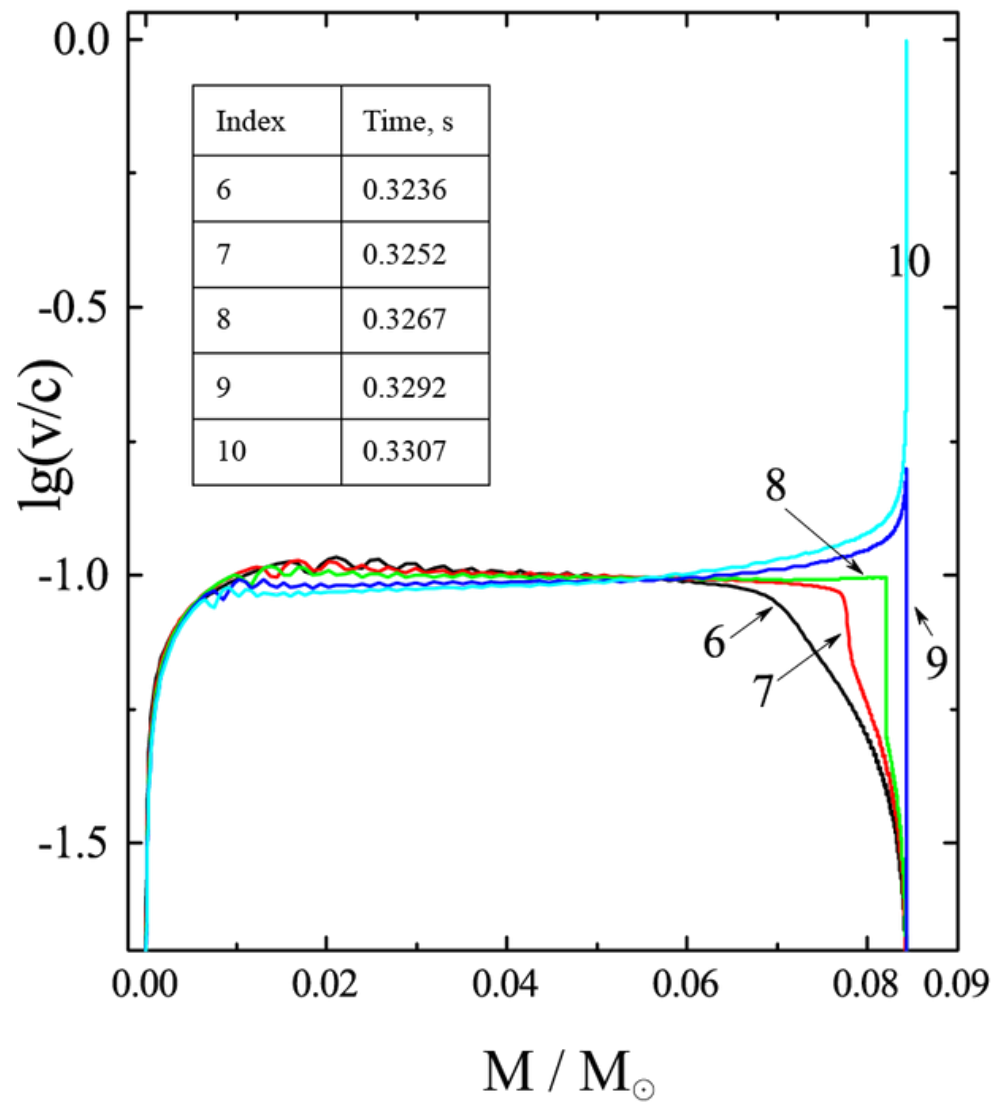
$M_{\text{NS}} \sim 0.1 M_{\text{solar}}$

$R_{\text{NS}} \sim 300 \text{ km}$

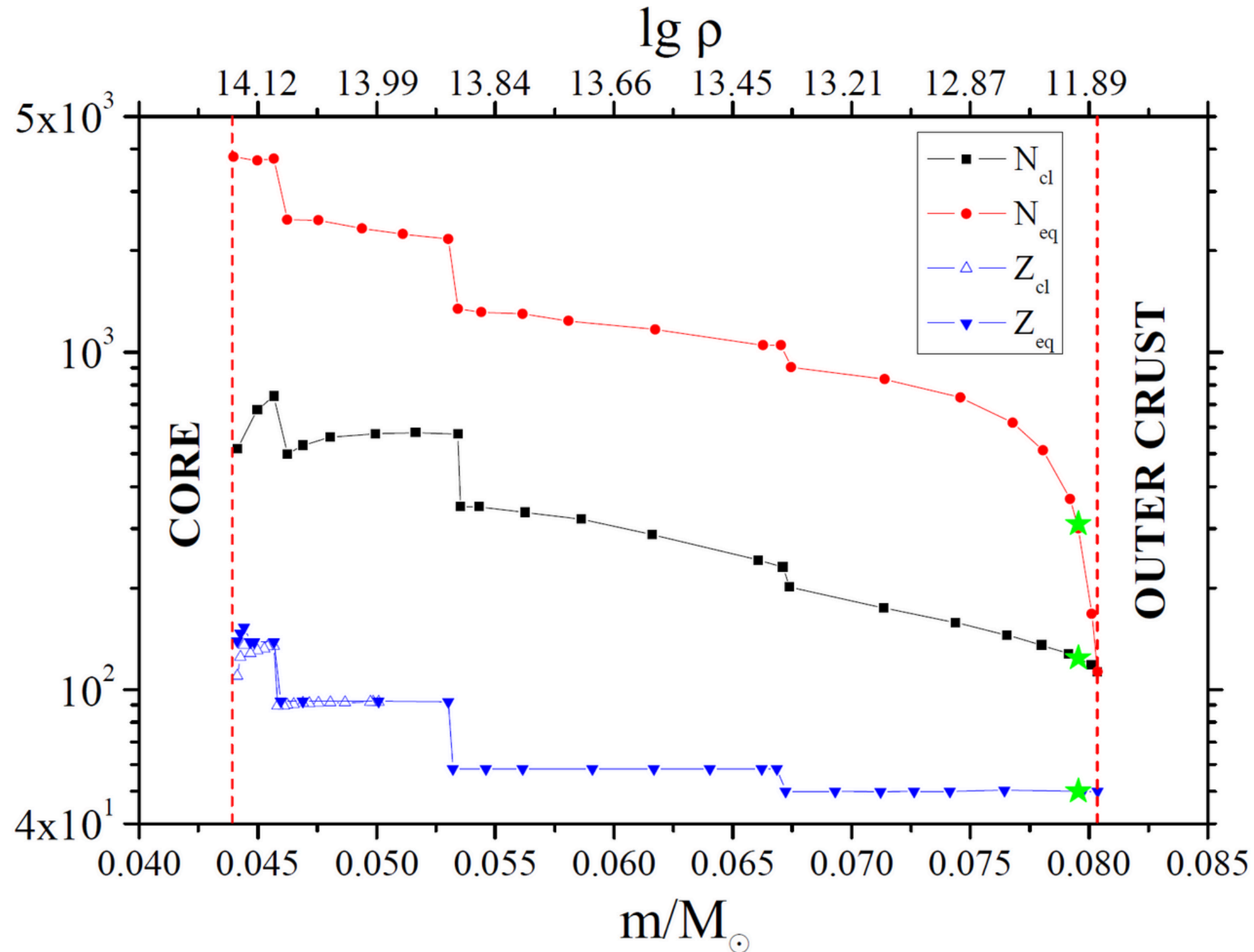
Blinnikov et al., *Astr. Rep.* 65, 385-391 (2021)

Yudin et al., *Particles* 6, 784-800 (2023)

Взрыв НЗ минимальной массы



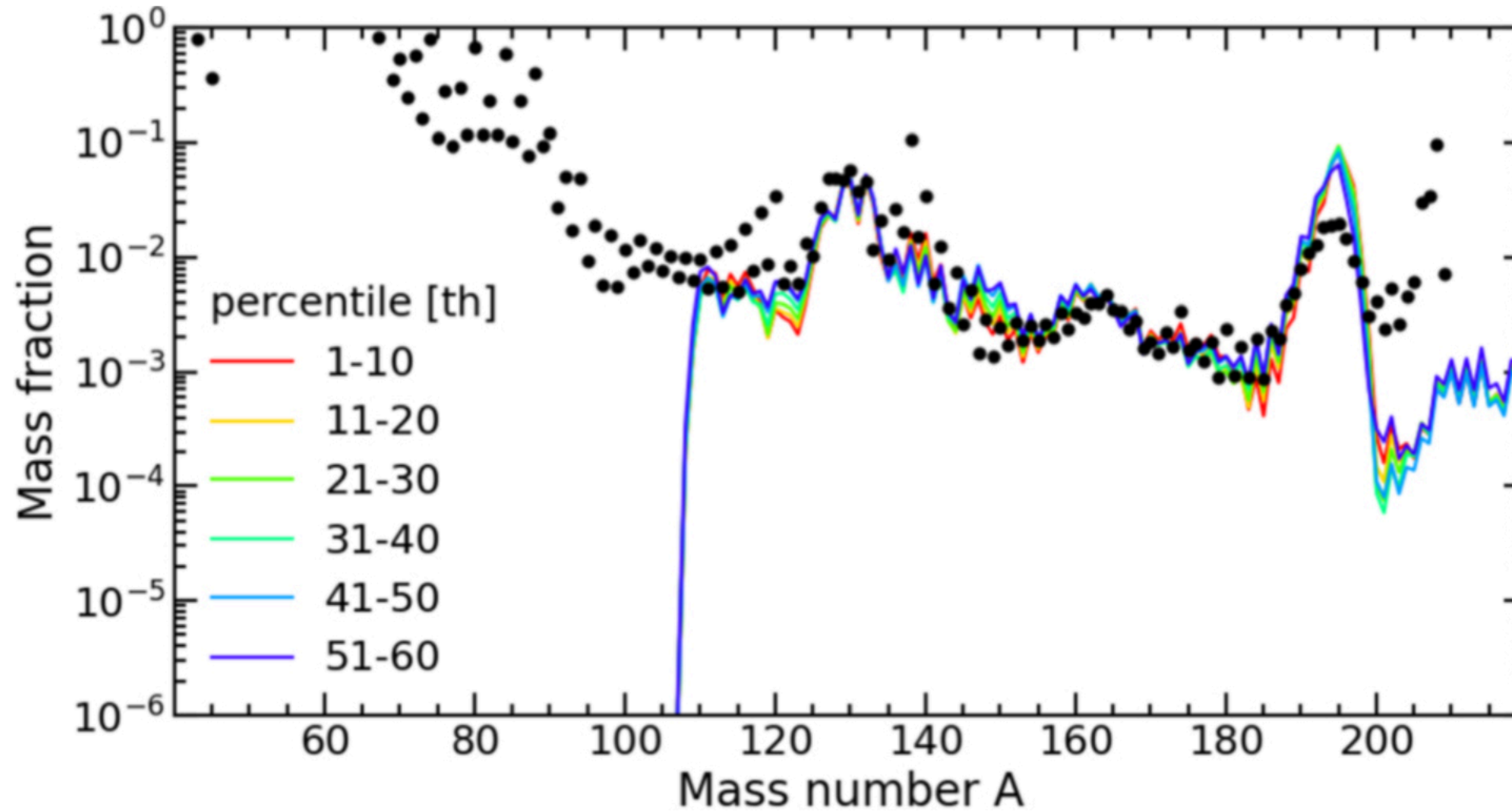
Нейтронно-избыточные ядра внутри НЗ



При взрыве НЗ минимальной массы также формируются:

- сверхтяжелые элементы,
- излучение килоновой,
- нетепловая компонента гамма-всплеска

Конечная распространенность элементов

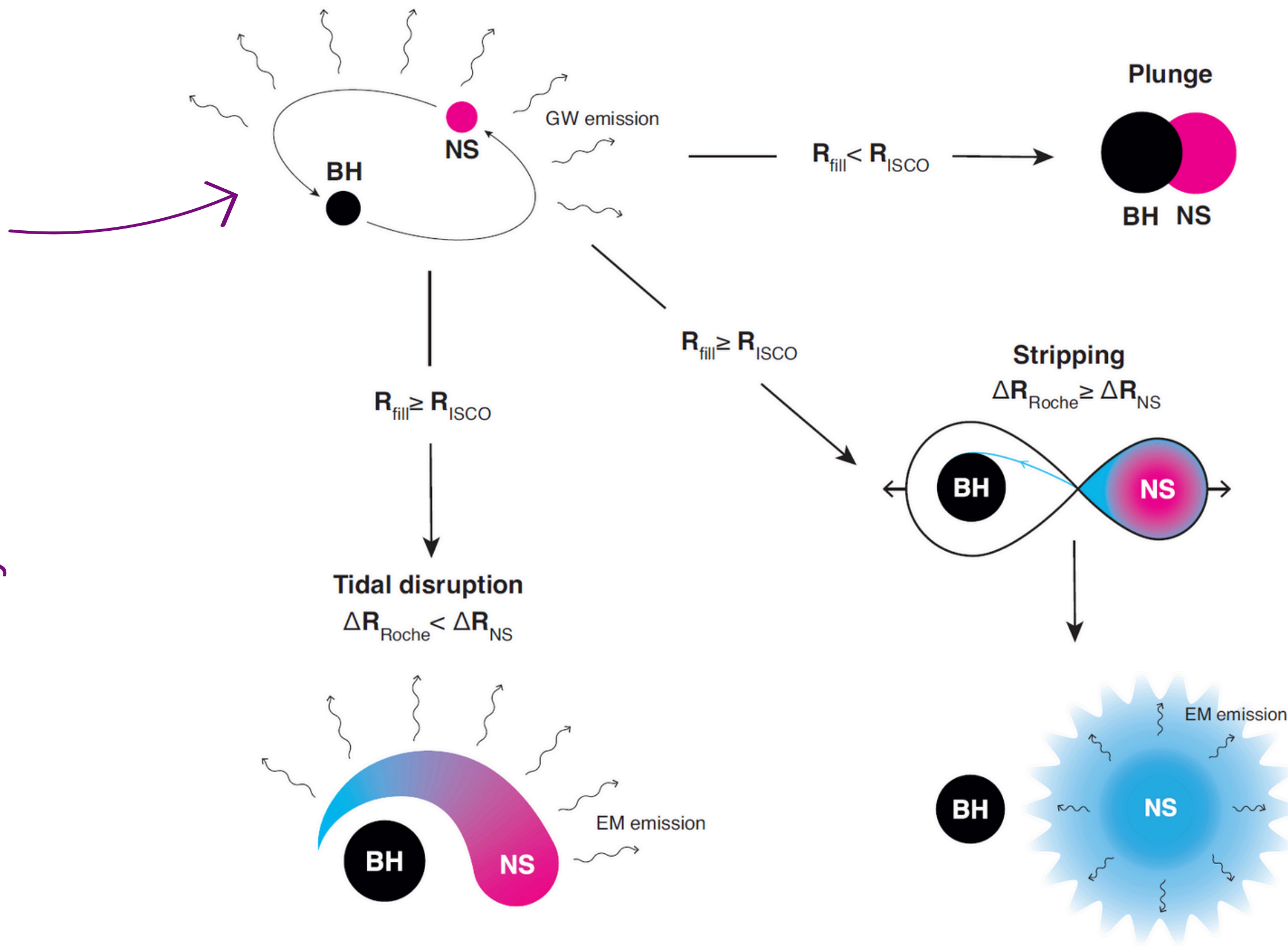


соответствие химическому
составу Солнечной
системы

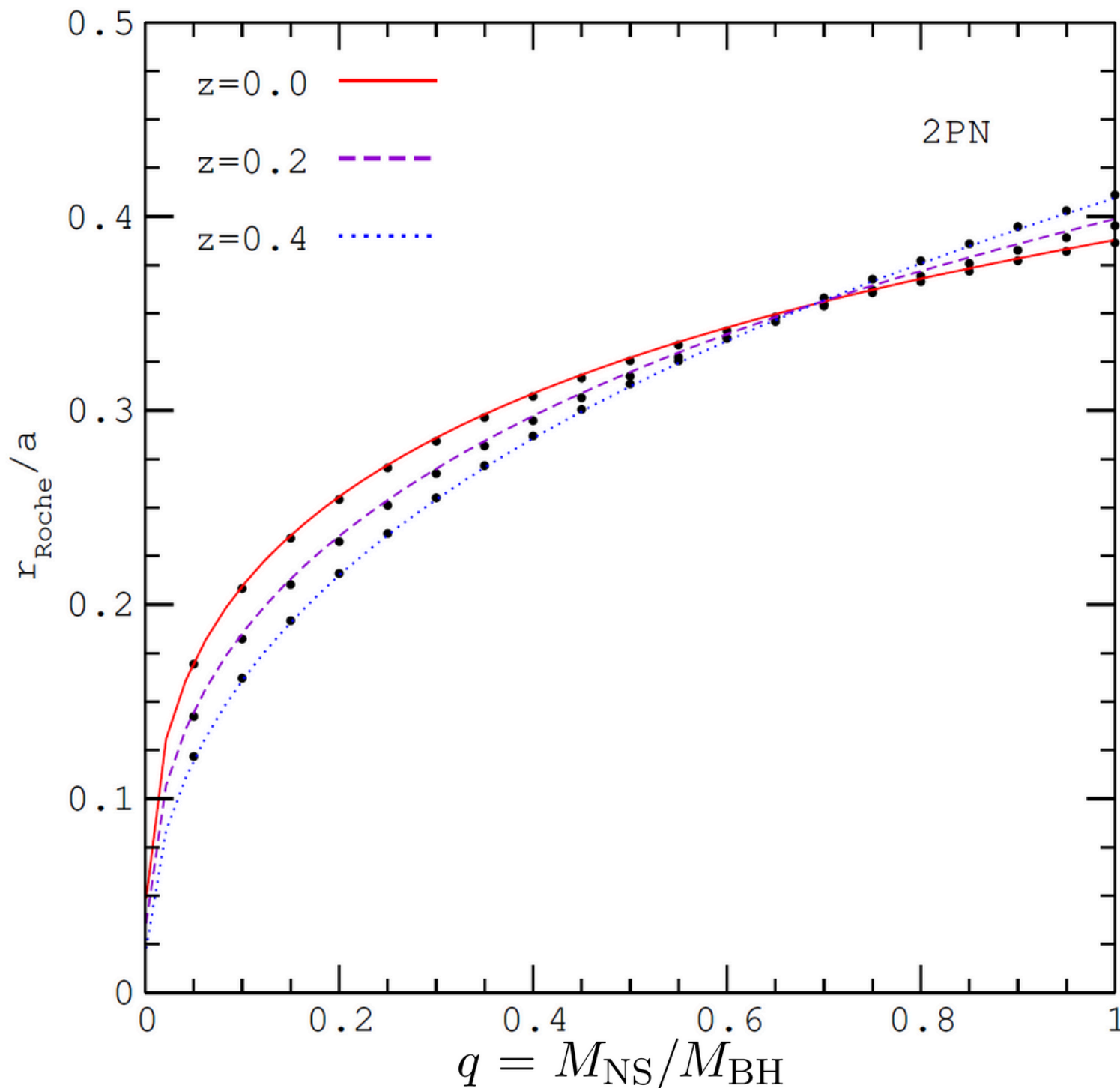
Условия обдирания НЗ в паре с ЧД

Три сценария эволюции системы НЗ-ЧД

начальные параметры системы:
массы компонент, спин ЧД и его
угол наклона



Вклад эффектов ОТО: размер полости Роша во 2ПН приближении



$$a = R_{\text{Roche}}/f(q, z), \quad z = \frac{2GM_{\text{tot}}}{c^2 a}$$

$$f(q, z) = \frac{0.49q^{2/3} \left[1 + z(1.951q^{1/5} - 1.812) \right]}{0.6q^{2/3} + \ln(1+q^{1/3})}$$

Ratcovic et al., arXiv:0512133v1 (2005)

Вклад эффектов ОТО: орбитальный момент системы

$$J_{\text{orb}} = J_{\text{orb}}^{\text{N}} \left[1 + z - \frac{3}{2\sqrt{8}} \left(2 + \frac{3}{2}q \right) \frac{\nu l}{q} z^{1.5} + \frac{42 - 43\nu}{64} z^2 \right]$$

$$\nu = M_{\text{BH}} M_{\text{NS}} / M_{\text{tot}}^2$$

$$q = M_{\text{NS}} / M_{\text{BH}}$$

$$z = \frac{2GM_{\text{tot}}}{c^2 a}$$

1ПН

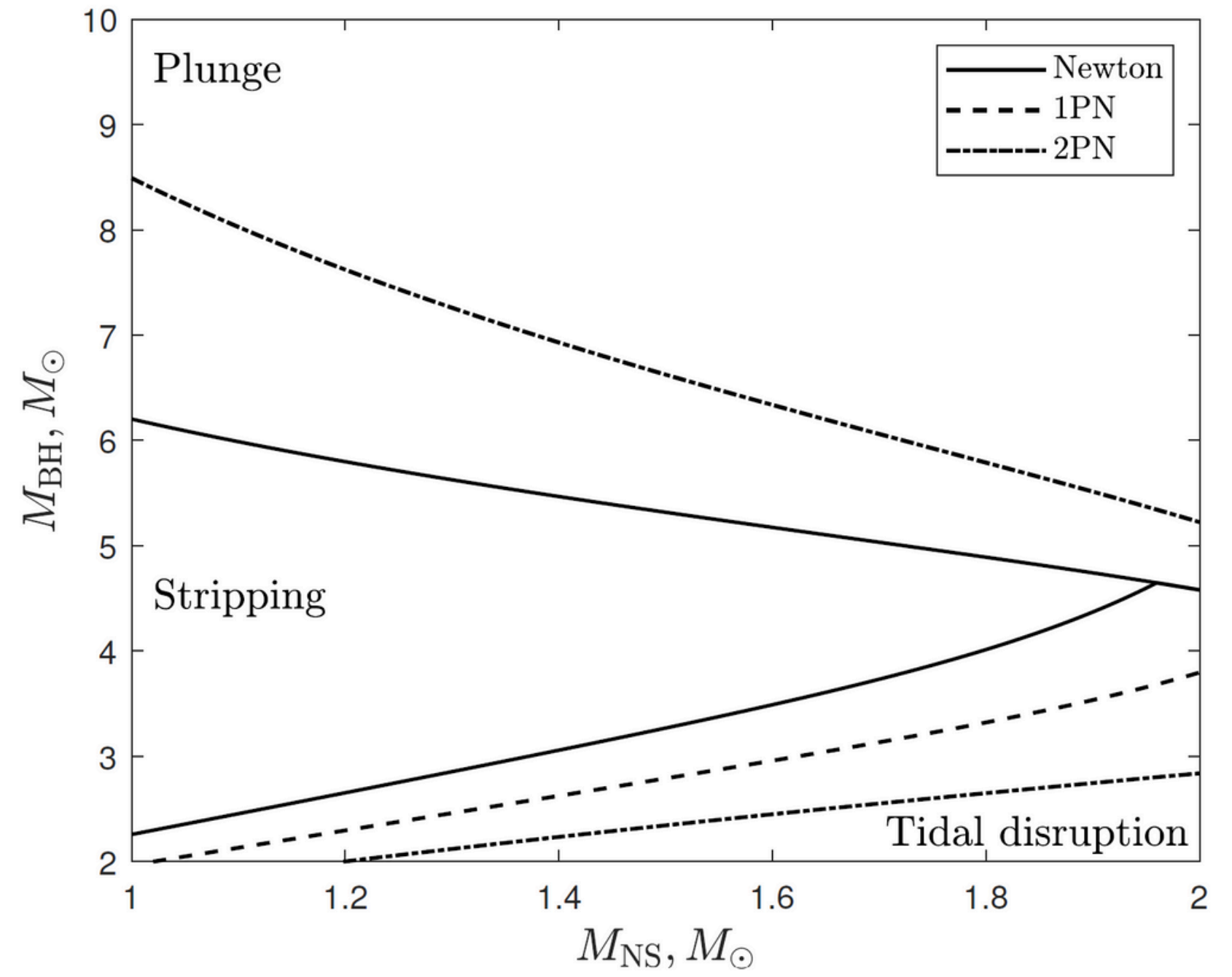
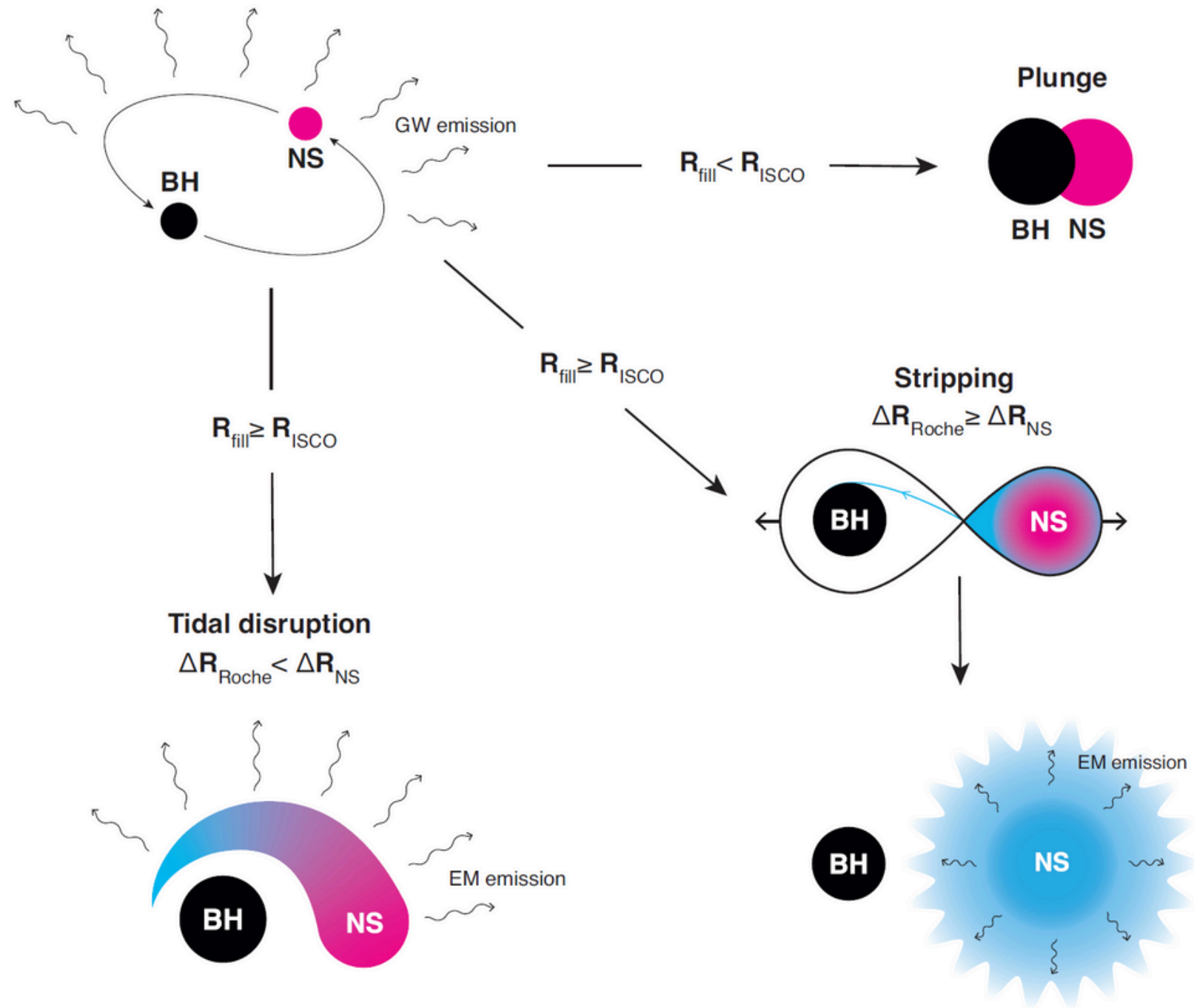
SO

2ПН

Schafer & Wex, *Phys. Let. A* 174, 196 (1993)

Wex, *Class. Quantum Grav.* 12, 983 (1995)

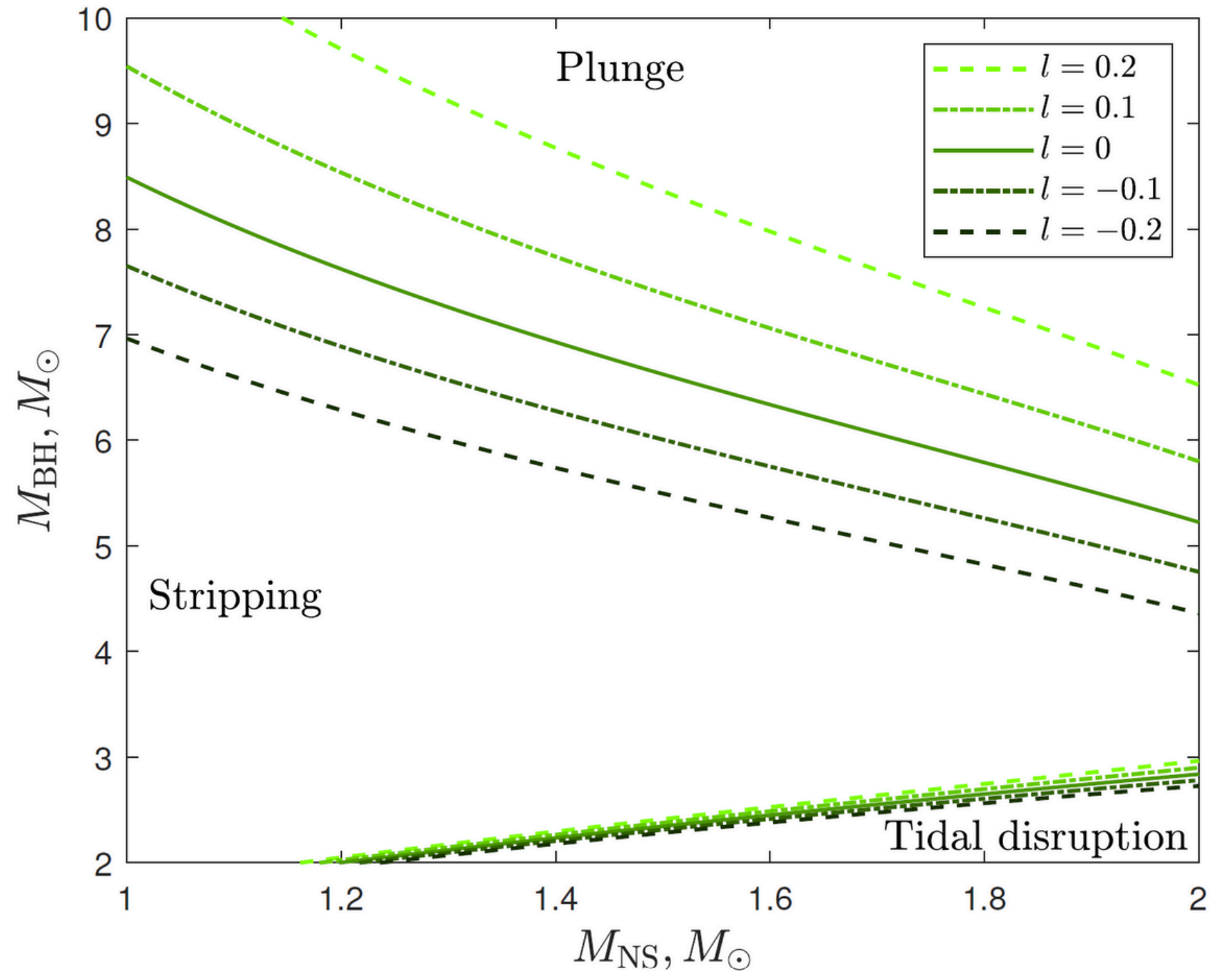
Вклад эффектов ОТО: массовая граница между сценариями



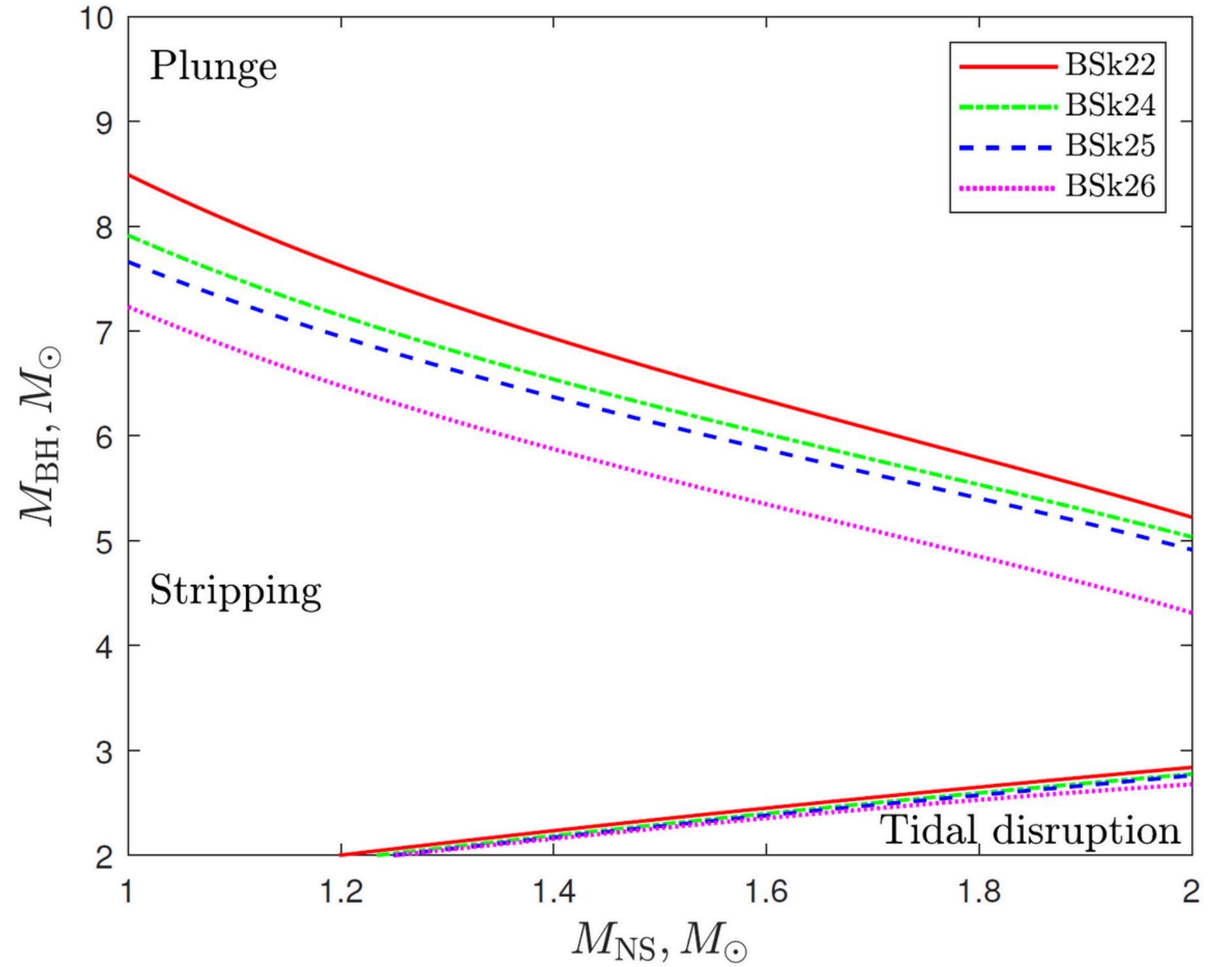
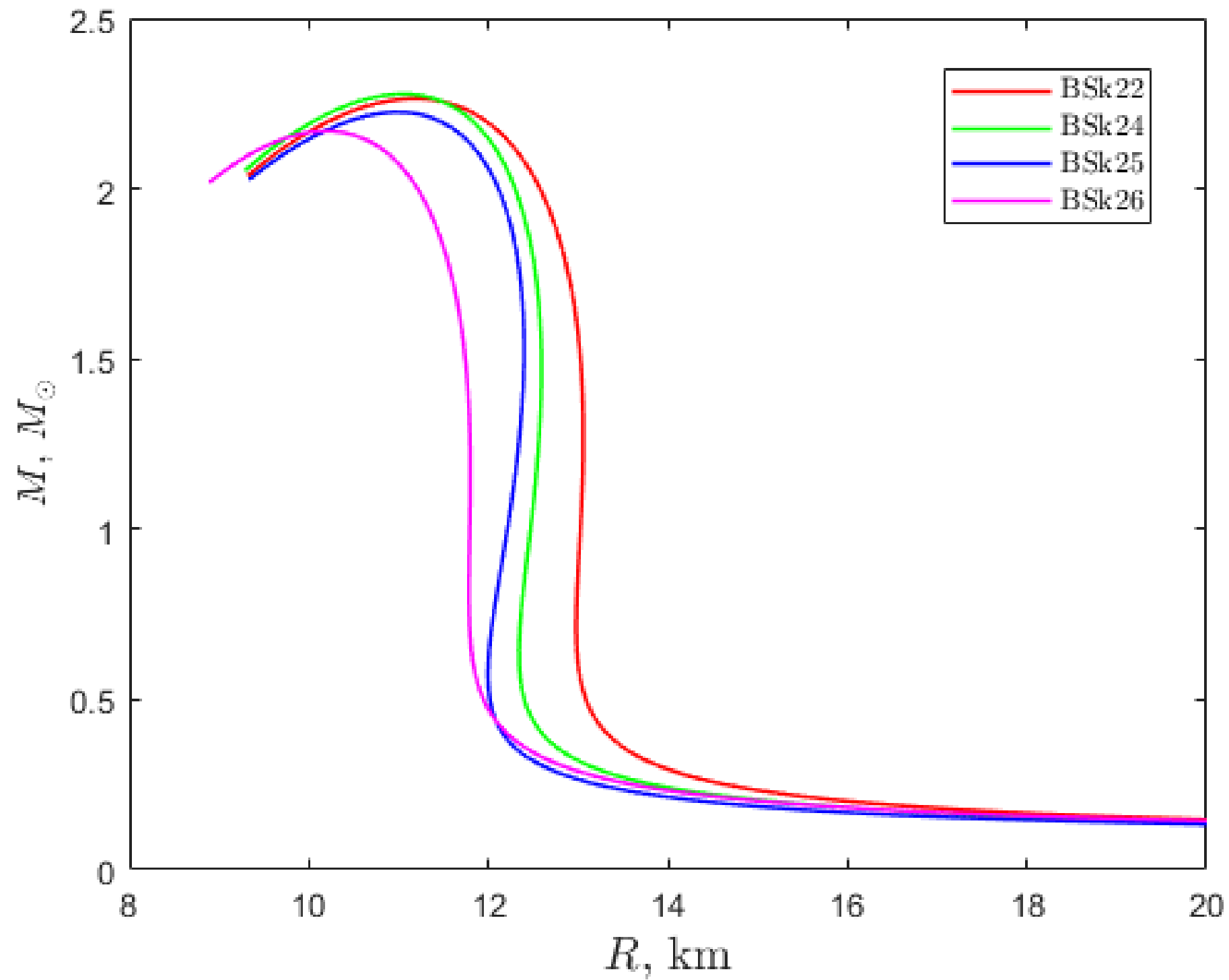
Влияние проекции спина ЧД

$$R_{\text{ISCO}}(\chi_{\text{BH}}, \theta_{\text{BH}}) = R_{\text{ISCO}}^{\text{eq}}(l),$$
$$l = \chi_{\text{BH}} \cos \theta_{\text{BH}}$$

$$R_{\text{ISCO}}^{\text{eq}} \in [4.5R_g; 0.5R_g],$$
$$l \in [-1; +1]$$



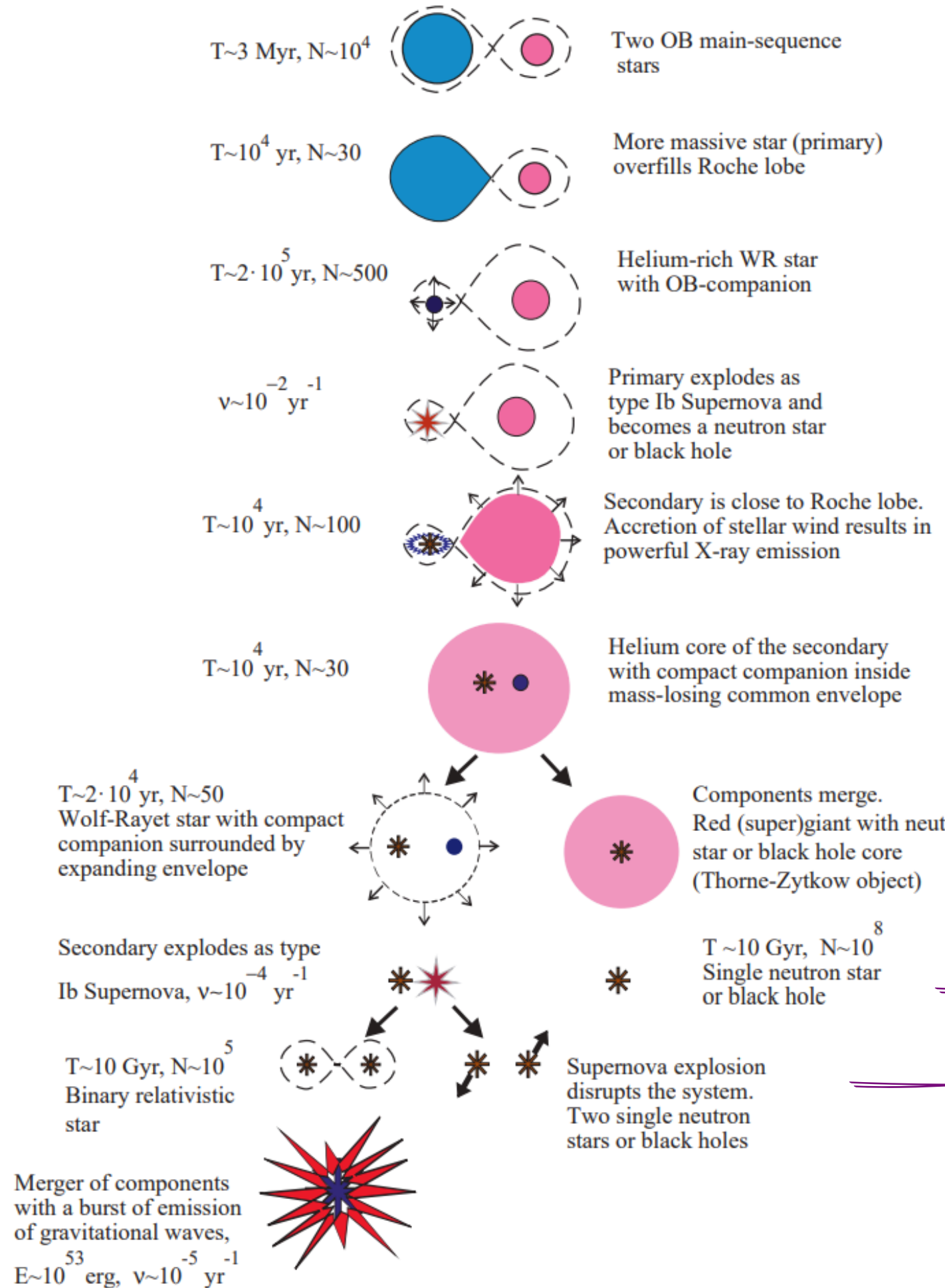
Влияние уравнения состояния НЗ



Популяционные расчеты систем НЗ-ЧД

Для количественных предсказаний доли числа систем НЗ-ЧД, где будет происходить обдиране или приливное разрушение НЗ и наблюдаться сопутствующая килоновая и гамма-всплеск, необходимо проведение серии расчетов эволюции двойных систем. Метод популяционного синтеза позволяет найти конечное распределение систем НЗ-ЧД по массам и спинам компонент. Сопоставляя эти распределения с полученными “картами” массовых границ между сценариями, можно получить долю числа систем НЗ-ЧД, где в конце концов произойдет обдиране и взрыв НЗ.

Основные источники неопределенности при расчетах:



параметр α_{CE}

масса НЗ после взрыва сверхновой

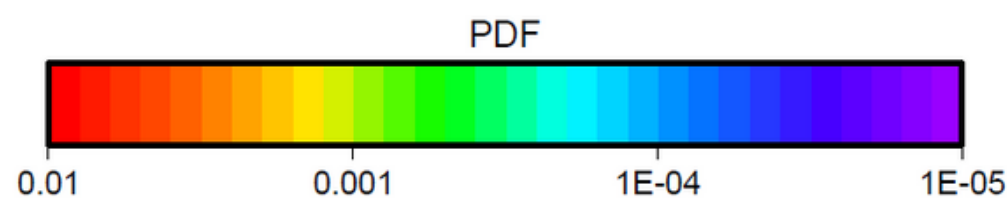
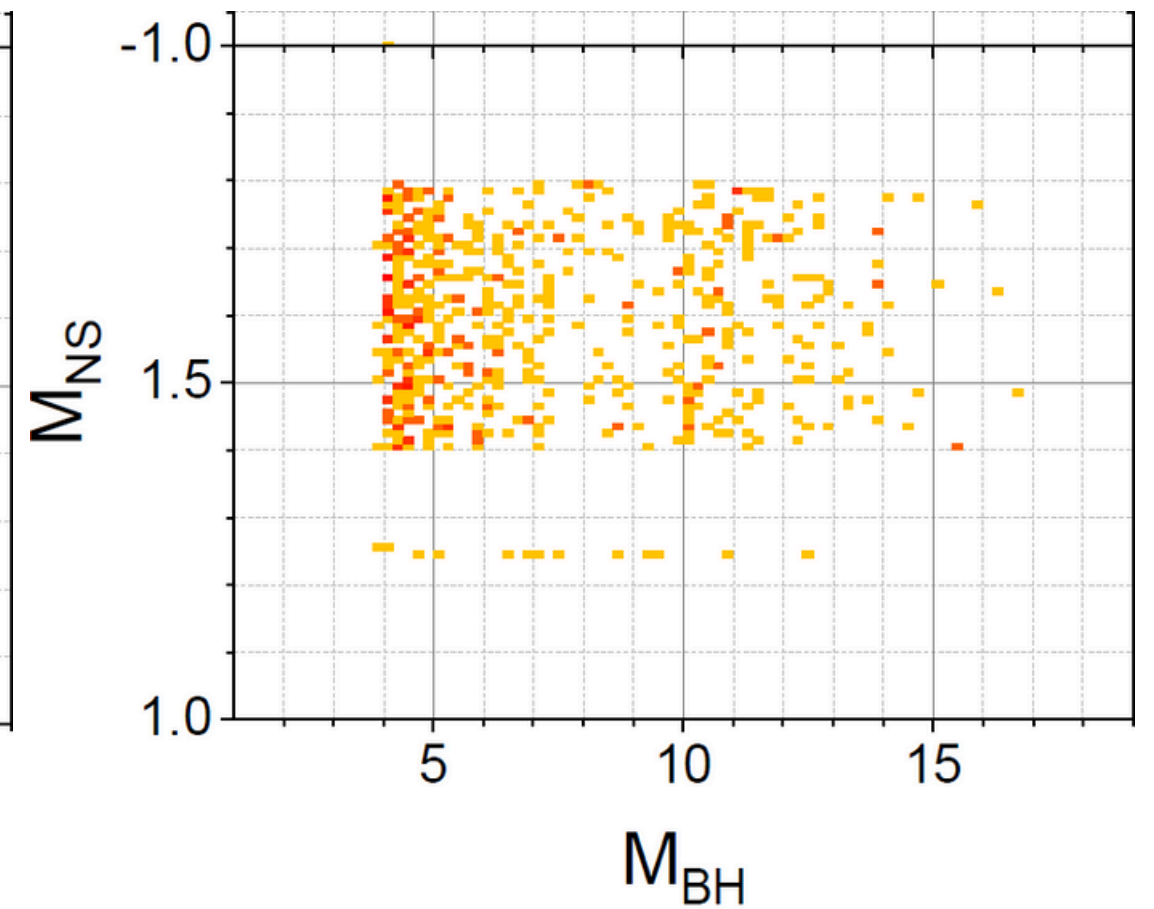
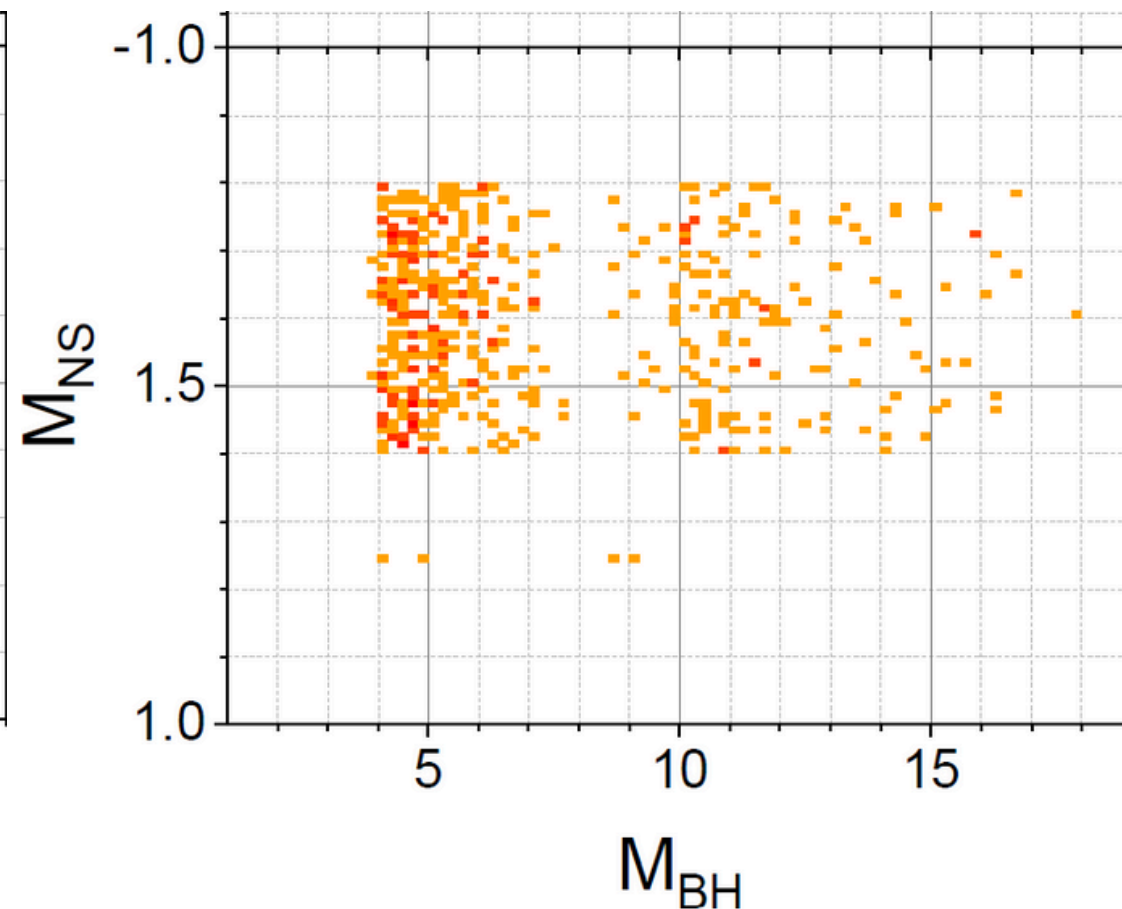
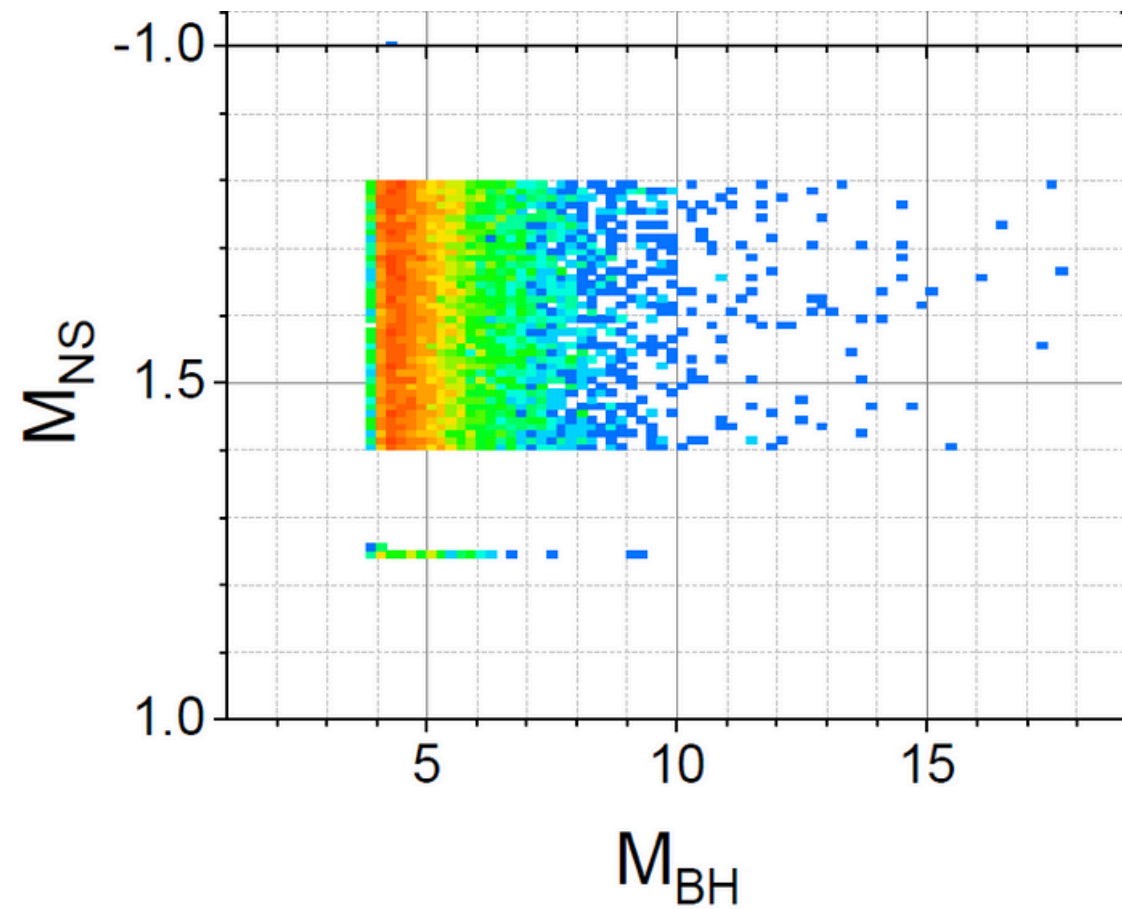
величина и направление “кика”

Влияние параметра общей оболочки

$Z_{\text{all}}, \alpha_{\text{CE}} = 4$

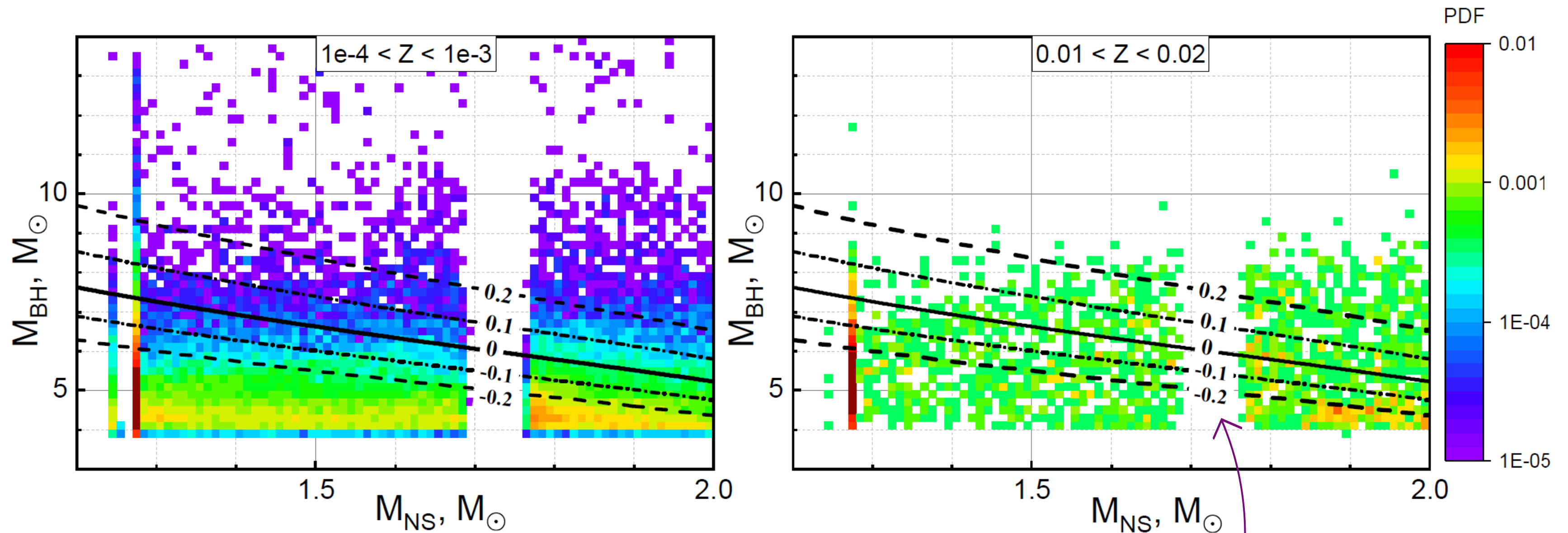
$Z_{\text{all}}, \alpha_{\text{CE}} = 1$

$Z_{\text{all}}, \alpha_{\text{CE}} = 0.5$



с ростом параметра общей оболочки меняется общее число систем НЗ-ЧД, но не сам вид распределения (то же самое касается величины кика)

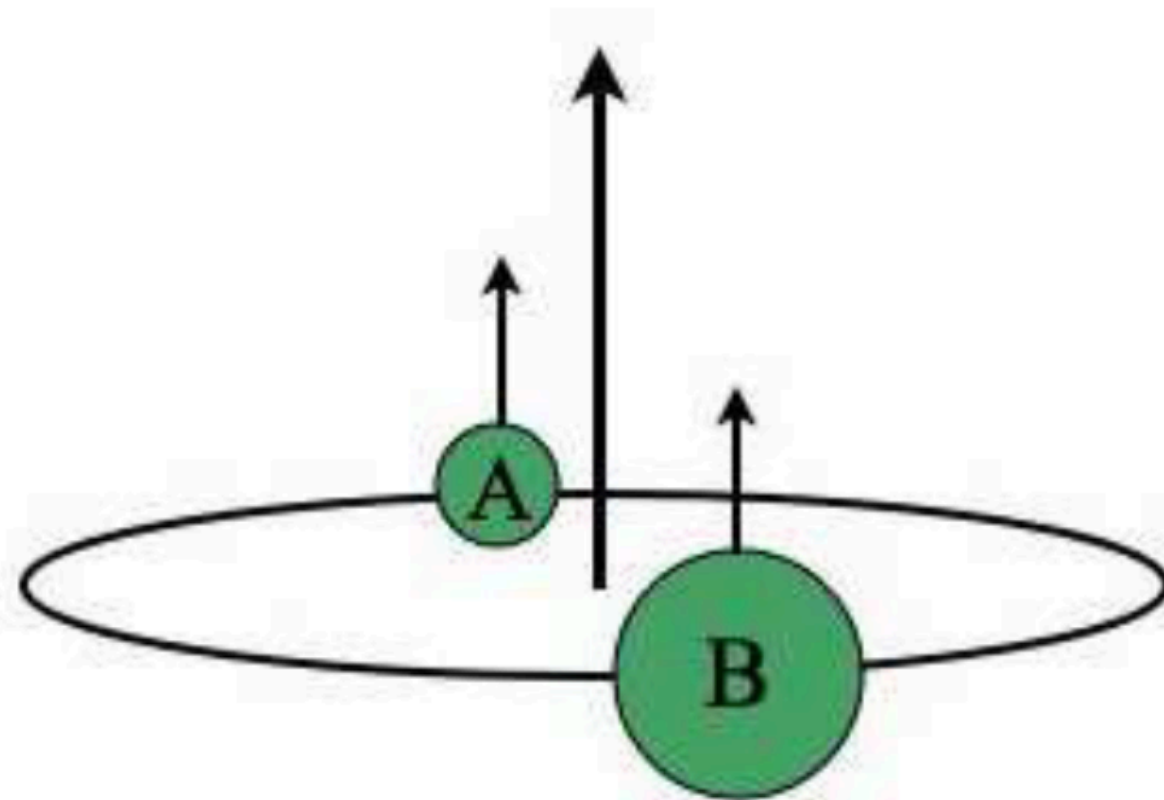
Конечное распределение масс НЗ-ЧД



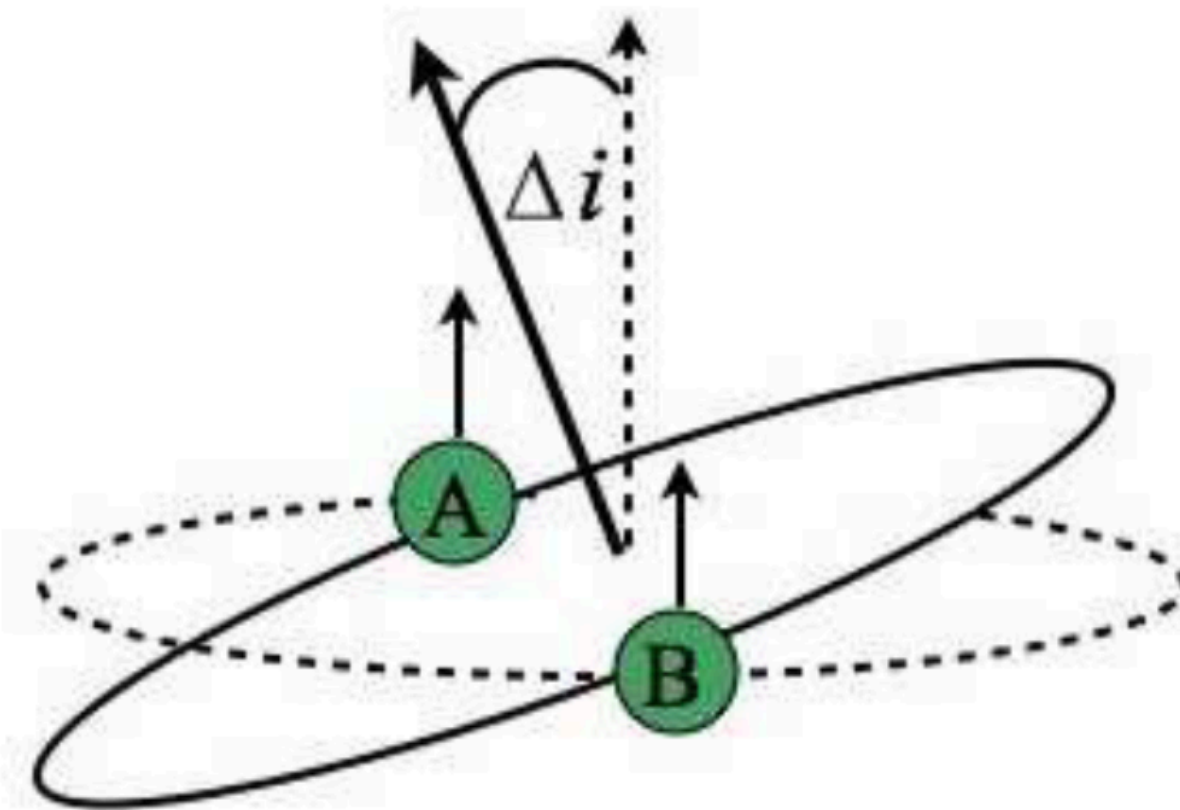
влияние проекции спина ЧД ($l = \chi_{BH} \cos \theta_{BH}$)
на положение границы между сценариями

Влияние кика сверхновой на наклон спинов компактных объектов

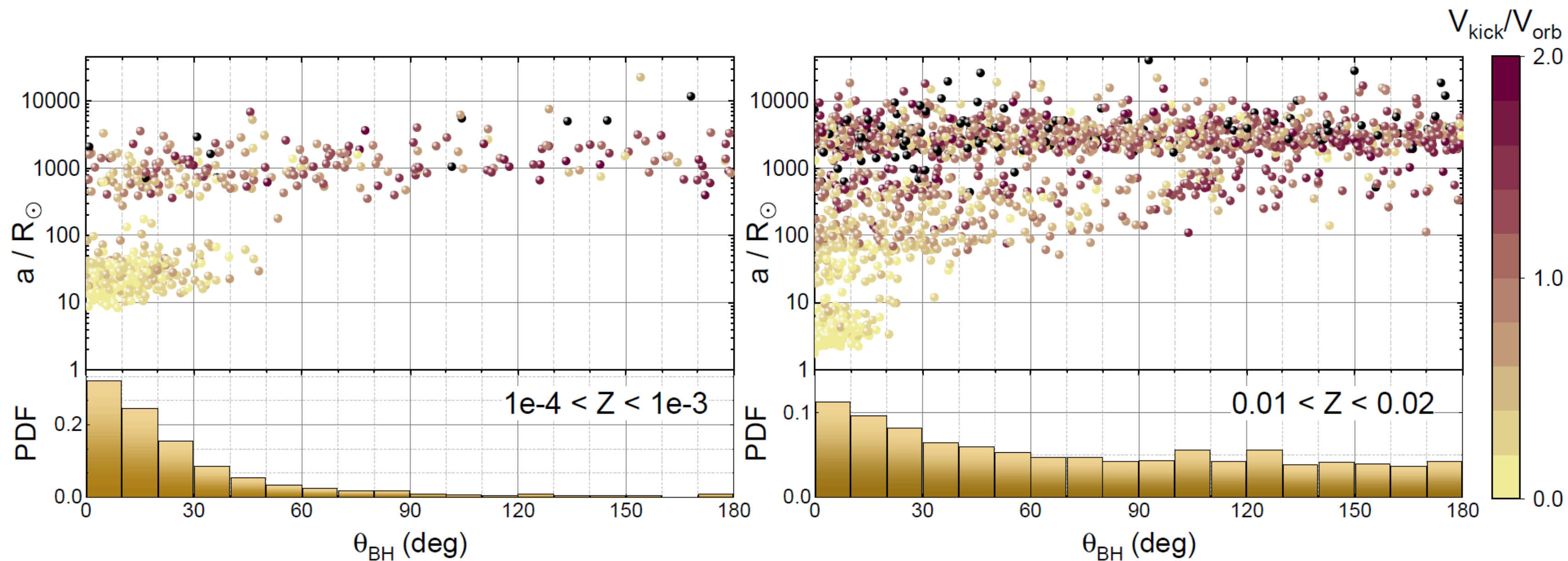
(a) Pre-SN orbit



(b) Post-SN orbit with an on-centre kick



Влияние металличности на распределение угла наклона спина ЧД



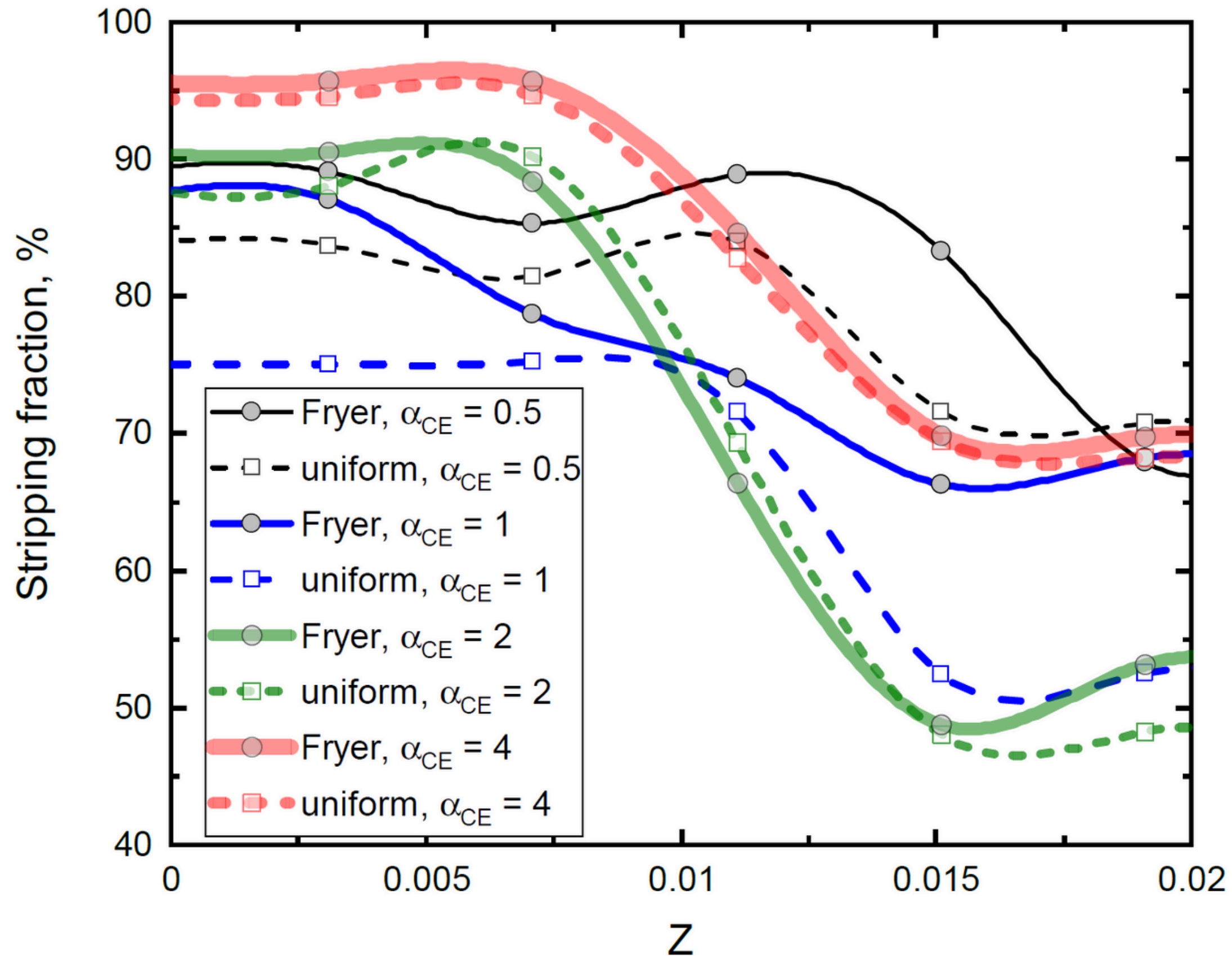
Увеличение металличности популяции ведет к...

$$l = \chi_{\text{ВН}} \cos \theta_{\text{ВН}}$$

росту интенсивности
звездного ветра и темпу
потери собственного
момента импульса
звездой-прародителем

увеличению угла наклона
спина ЧД

Доля сценария обдирания среди всех систем НЗ-ЧД



Основные выводы и перспективы развития

Учет эффектов ОТО ведет к увеличению области stripping-механизма.

Обдирание НЗ реализуется в 50-90% случаев в зависимости от используемых модельных предположений эволюции тесных двойных систем.

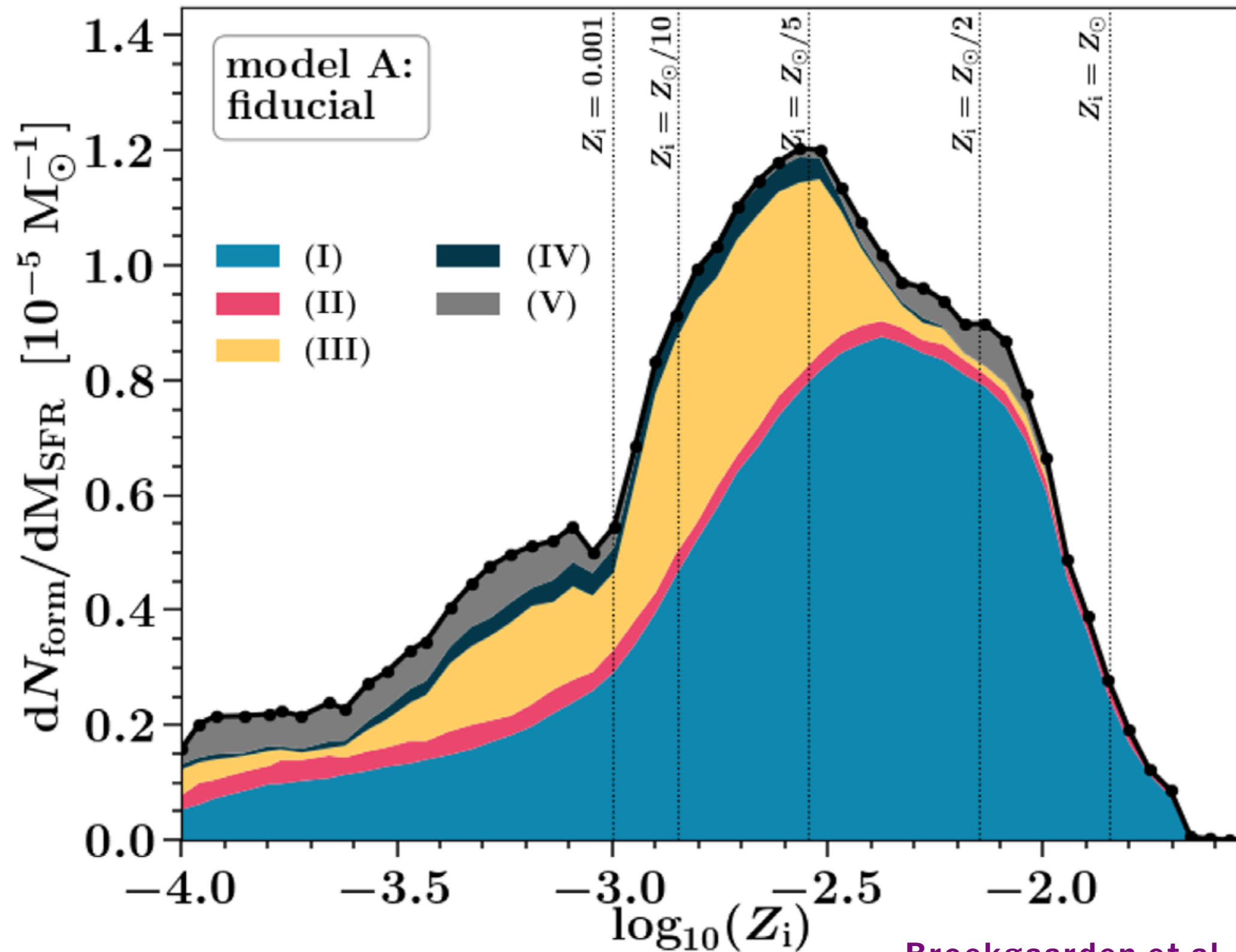
С уменьшением металличности родительской звездной популяции доля сценария обдирания растет.

В будущем необходимо учесть влияние несферичности НЗ на устойчивость перетекания.

Также нужно решить ограниченную задачу 3-х тел в ОТО и уточнить аппроксимации момента импульса.

Предсказание темпа регистрации килоновых от взрыва НЗ минимальной массы в системах НЗ-ЧД.

Общий темп формирования систем НЗ-ЧД



Критерий устойчивости перетекания вещества в первом и втором ПН приближениях

$$a = R_{\text{Roche}}/f(q, z), \quad z = \frac{2GM_{\text{tot}}}{c^2 a}$$

$$f(q, z) = \frac{0.49q^{2/3} [1 + z(1.951q^{1/5} - 1.812)]}{0.6q^{2/3} + \ln(1+q^{1/3})}$$

$$f(q, z) = f_{\text{Egg}}(q)[1 + zf_z(q)]$$

$$\frac{d \ln R_{\text{NS}}}{d \ln M_{\text{NS}}} \geq (1+q) \left[\frac{d \ln f_{\text{Egg}}}{d \ln q} + zq \frac{df_z}{dq} \right] -$$

$$-2(1-q) [1 + z(2 - f_z)] + 2j(1+q) [1 + z(1 - f_z)]$$

$$\frac{d \ln R_{\text{NS}}}{d \ln M_{\text{NS}}} \geq (1+q) \left[\frac{d \ln f_{\text{Egg}}}{d \ln q} + \frac{zq}{1 + zf_z} \frac{df_z}{dq} \right]$$

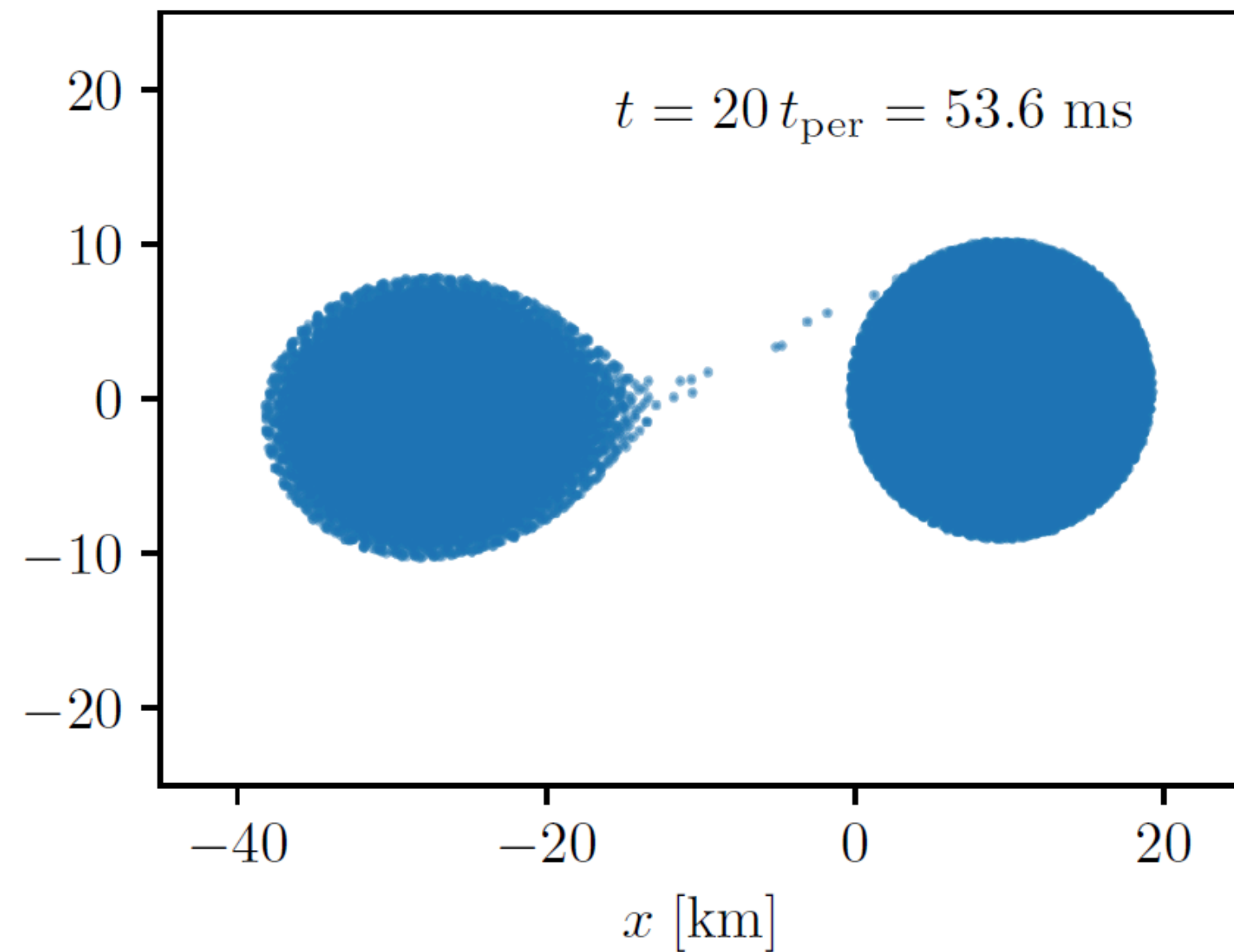
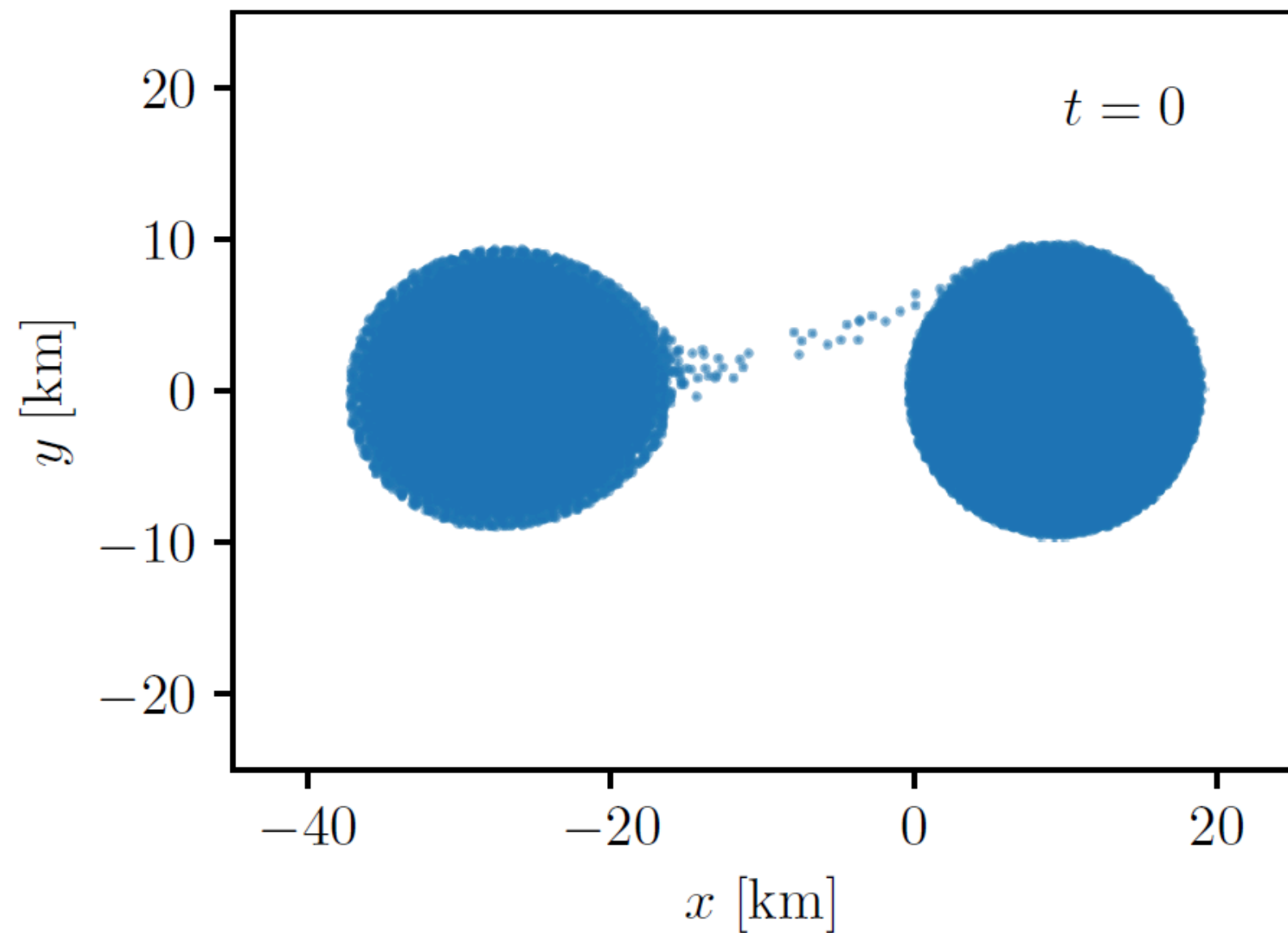
$$- \frac{2 [(1-q)(1+z - \alpha_{\text{SO}} z^{1.5} + \alpha_2 z^2)]}{1 - z + 2\alpha_{\text{SO}} z^{1.5} - 3\alpha_2 z^2}$$

$$\times \left[\frac{1}{1 + zf_z} \right] + \frac{2 [j(1+q) + \alpha_{\text{SO}}^{\text{M}} z^{1.5} - \alpha_2^{\text{M}} z^2]}{1 - z + 2\alpha_{\text{SO}} z^{1.5} - 3\alpha_2 z^2}$$

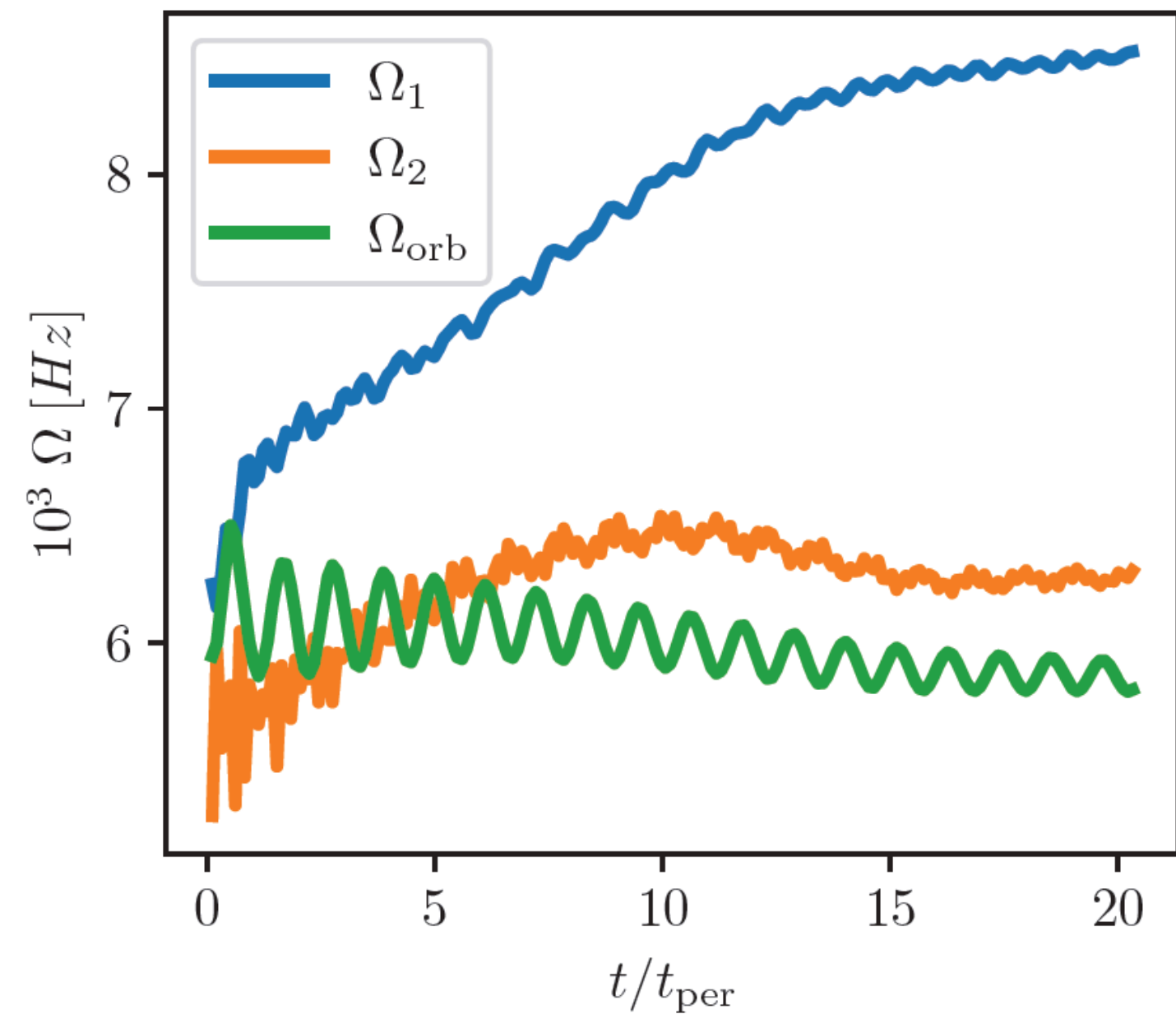
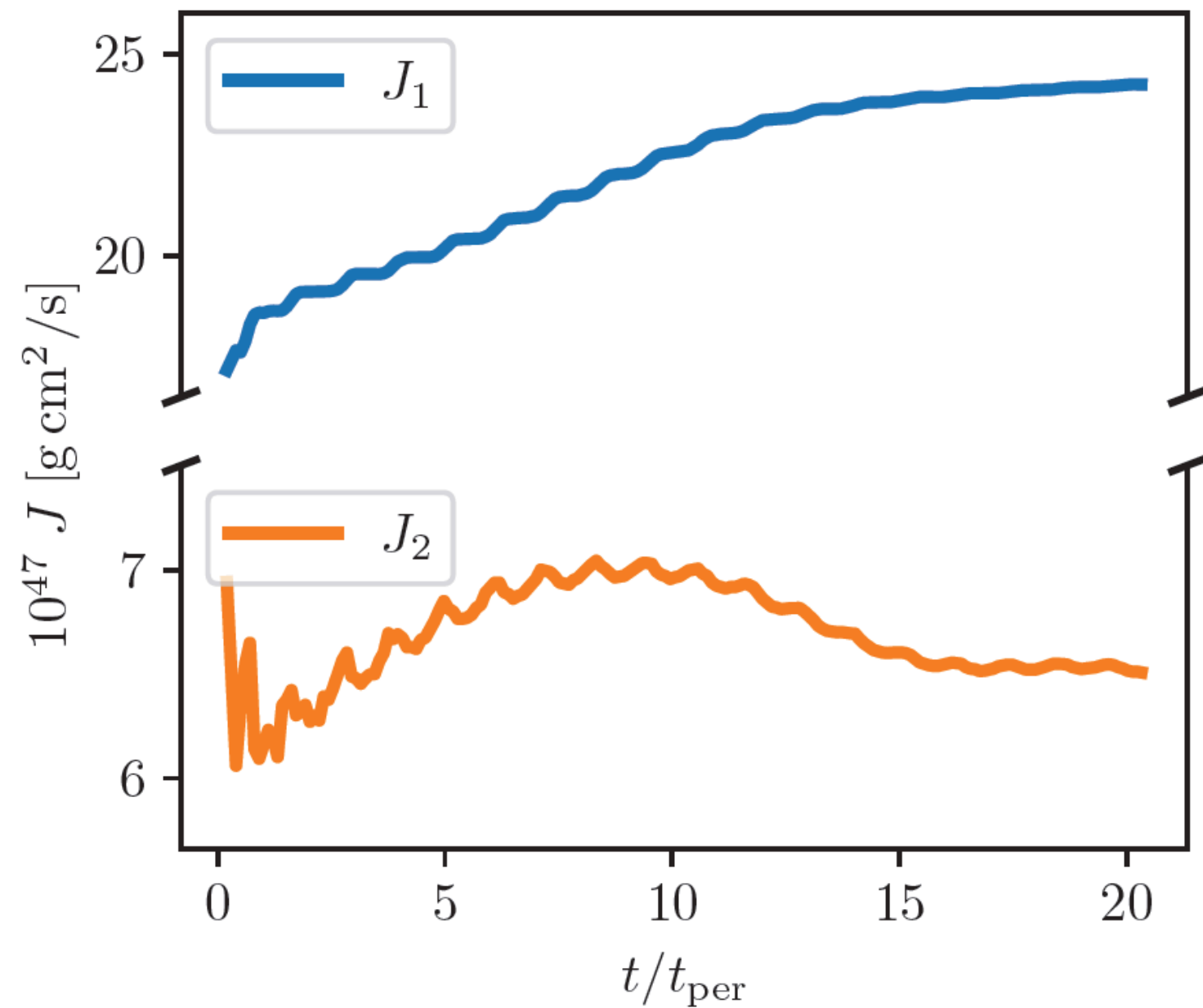
$$\times \left[\frac{1}{1 + zf_z} \right].$$



Аккреционная раскрутка массивного компонента: гидродинамическое моделирование обдирания НЗ



Аккреционная раскрутка массивного компонента: гидродинамическое моделирование обдирания НЗ



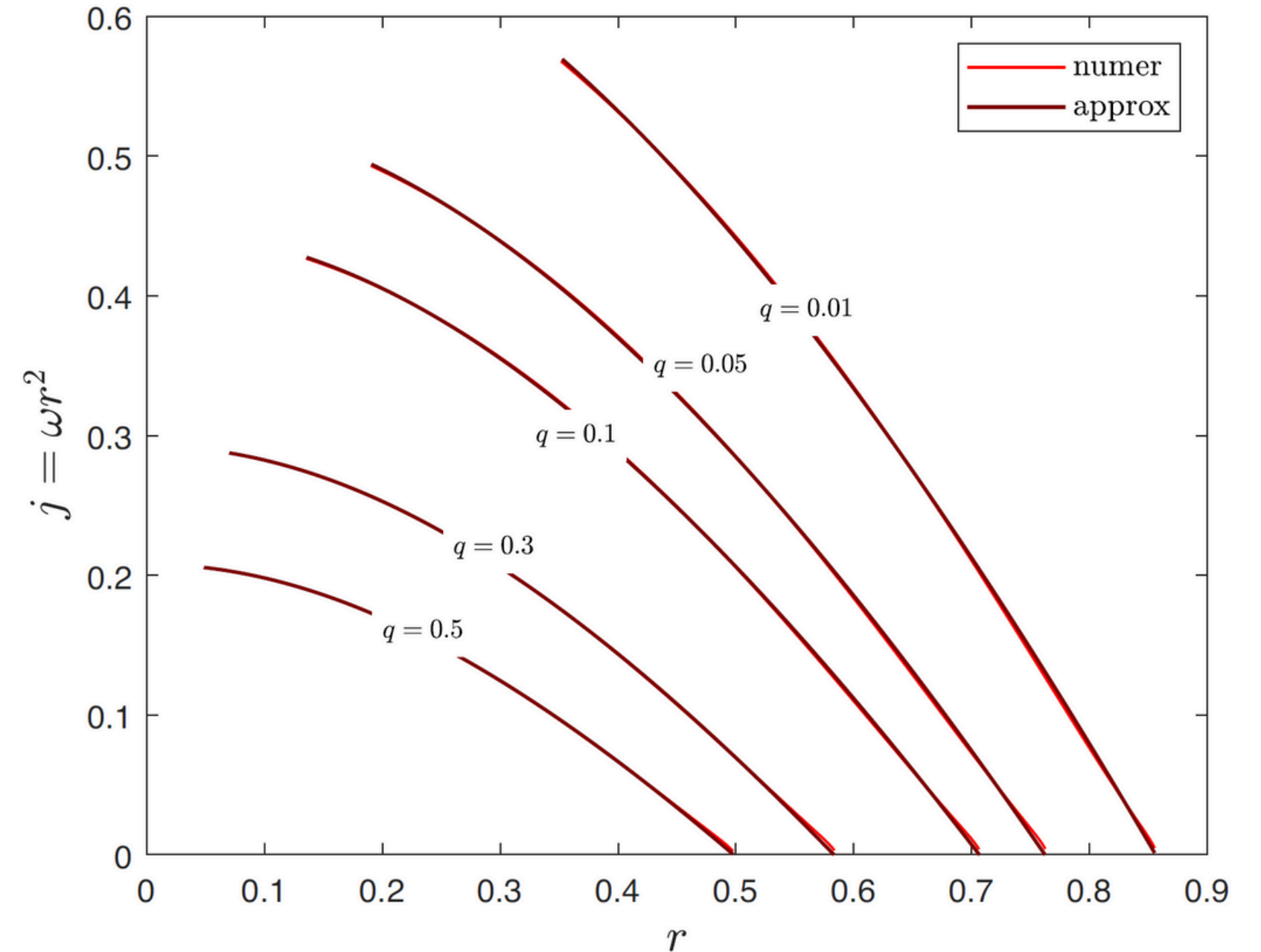
Аккреционная раскрутка ЧД: аналитическое описание

$$\dot{J}_{\text{GW}} = \dot{J}_{\text{orb}} + \dot{J}_{\text{BH}}$$

$$\dot{J}_{\text{BH}} = -\dot{M}_{\text{NS}} j a^2 \Omega_{\text{orb}}$$

$$j(q, r_1) = j(q, r_1) + r_1 (r_1 - q \cos \varphi)$$

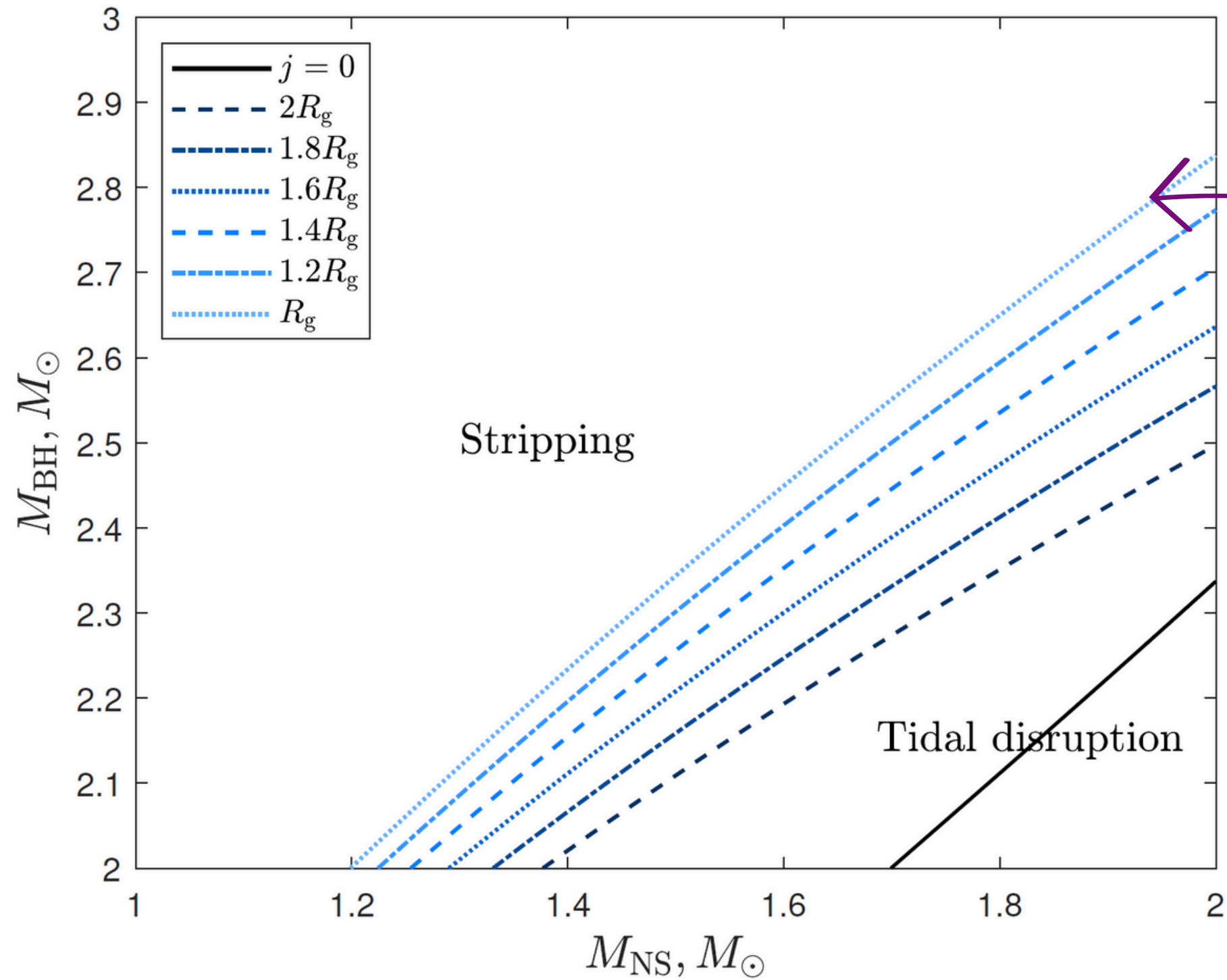
$$j = c_1(q) - \sqrt{c_2(q)(r^2 - r_{L_1}^2) + c_1^2(q)}$$



Kramarev & Yudin, *MNRAS* 522, 626 (2023)

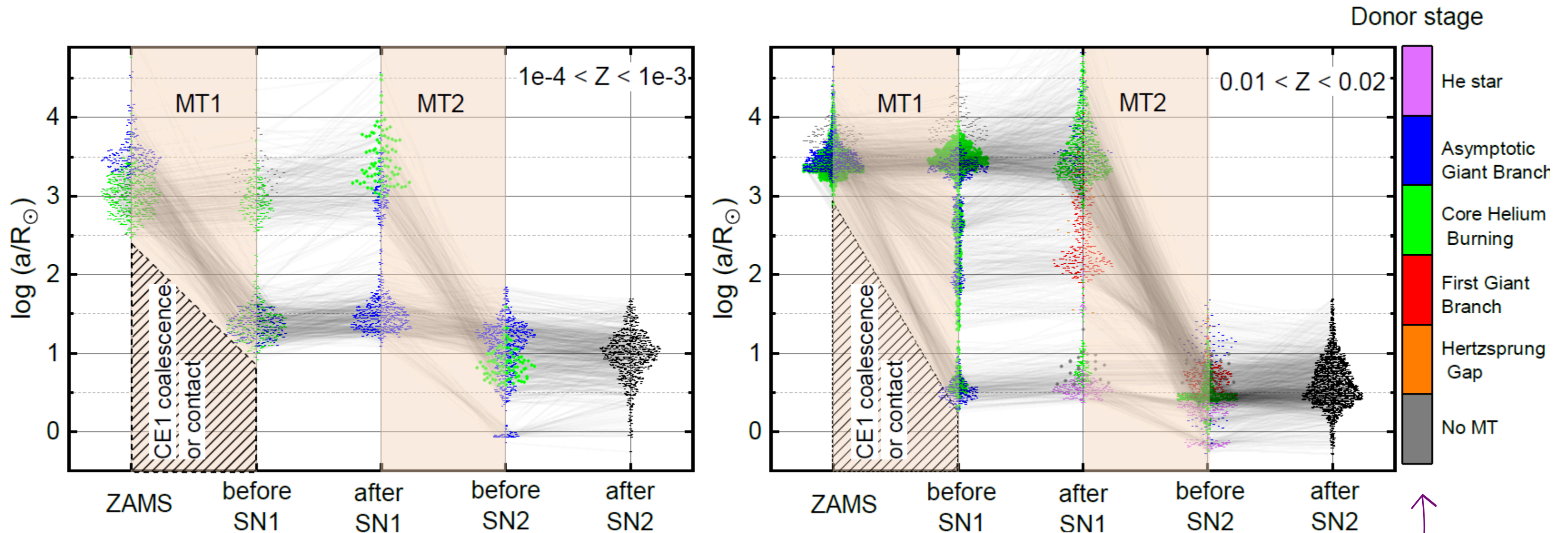
Kramarev & Yudin, *MNRAS* 525, 3306 (2023)

Аккреционная раскрутка ЧД: массовая граница между сценариями



Используем в дальнейшем
крайнюю кривую для
построения оценки снизу

Сближение компонентов во время обмена масс



32 дозор в изначально широкой системе успеваеэ проэволюционировать до более поздней стадии, что способствует неустойчивому обмену масс и сильному сближению звезд